

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Construcción con tecnología ALM de carcasa
protectora y posicionadora de patrón de calibración
de software

Autor: Alejandro Alcaide Vera

Tutor: Marcos Borrego Puche

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Construcción con tecnología ALM de carcasa protectora y posicionadora de patrón de calibración de software

Autor:
Alejandro Alcaide Vera

Tutor:
Marcos Borrego Puche
Profesor sustituto interino

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Construcción con tecnología ALM de carcasa protectora y posicionadora de patrón de calibración de software

Autor: Alejandro Alcaide Vera

Tutor: Marcos Borrego Puche

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mis padres
A mi hermano
A mi pareja
A mis amigos

Este proyecto nace de la necesidad de mejorar el método usado para calibrar el software de ARAMIS. Para ello ha sido necesario diseñar y fabricar un mecanismo que permita posicionar el patrón en las diferentes posiciones solicitadas por el software.

En primer lugar, se realiza un diseño mediante bocetos del mecanismo hasta encontrar una solución que pueda servir. Seguidamente se realiza el modelado de las piezas en SolidWorks y se prepara para la impresión.

El diseño del mecanismo ha sido un proceso iterativo, el cual ha necesitado varias modificaciones durante el proceso de impresión y mejoras una vez impresas las piezas, hasta corregir todos los fallos y debilidades del mecanismo.

Finalmente, se ha comprobado la utilidad del mismo realizando una calibración del software de manera satisfactoria. Estos resultados reflejan el gran potencial que poseen las técnicas de fabricación aditiva, en particular el modelado por deposición de fundido, por tratarse de una técnica rápida, barata y eficaz.

Resumen	ix
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
1 Objetivos del proyecto	1
2 Fabricación Aditiva	5
2.1 Pasos del proceso de ALM	6
2.2 Tecnologías	8
2.3 Aplicaciones	9
2.4 Justificación del uso de la tecnología ALM	9
3 Programa CAD	10
3.1 Softwares CAD disponibles en el mercado	10
3.2 Introducción a SolidWorks	11
4 Programa Slicer	14
4.1 Softwares disponibles en el Mercado	14
4.2 Introducción a Ultimaker Cura	17
5 Impresión 3D	21
5.1 Historia de las impresoras 3D	21
5.2 Impresora 3D del proyecto	22
6 Diseño del utillaje	26
6.1 Diseño preliminar	26
6.2 Versión 1	30
6.2.1 Modelado	30
6.2.2 Ensamblaje	53
6.2.3 Impresión	58
6.2.4 Mejoras en el diseño	62
6.3 Versión 2	64
6.3.1 Modelado	64
6.3.2 Ensamblaje	80
6.3.3 Impresión	82
6.3.4 Montaje	99
6.3.5 Ensayo	100
6.3.6 Mejoras en el diseño	100
6.4 Versión 3	101
6.4.1 Modelado	101
6.4.2 Ensamblaje	102

6.4.3	Impresión	102
6.4.4	Montaje	102
6.4.5	Ensayo	103
7	Prueba de funcionamiento	104
8	Conclusiones y desarrollos futuros	107
8.1	<i>Conclusiones</i>	107
8.2	<i>Desarrollos futuros</i>	108
	Referencias	111
	Anexos	113
	<i>Anexo A: Esquemas de diseño.</i>	115
	<i>Anexo B: Planos.</i>	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Ficha técnica de la impresora Creality Ender 3 (23)	22
Tabla 5.2 Propiedades del PLA	25
Tabla 6.1 Parámetros de impresión de C21, primera prueba.	83
Tabla 6.2 Parámetros de impresión de la pieza C21.	86
Tabla 6.3 Parámetros de impresión de la pieza C22.	86
Tabla 6.4 Parámetros de impresión de la pieza C23.	87
Tabla 6.5 Parámetros de impresión de la pieza C24	89
Tabla 6.6 Parámetros de impresión de la pieza C25.	89
Tabla 6.7 Parámetros de impresión de la pieza M21.	91
Tabla 6.8 Parámetros de impresión de las piezas M22.1 y M22.2.	92
Tabla 6.9 Parámetros de impresión de prueba.	93
Tabla 6.10 Parámetros de impresión de la pieza M23.	93
Tabla 6.11 Parámetros de impresión de la pieza M24.	94
Tabla 6.12 Parámetros de impresión de la pieza M25.	94
Tabla 6.13 Parámetros de impresión de la pieza M26.	95
Tabla 6.14 Parámetros de impresión de la pieza B21.	96
Tabla 6.15 Parámetros de impresión de la pieza B22.	97
Tabla 6.16 Parámetros de impresión de la pieza B23.	98
Tabla 7.1 Resultados pruebas de funcionamiento.	106
Tabla 8.1 Resumen de recursos empleados.	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Imagen de las cámaras del sistema ARAMIS. (37)	1
Figura 1.2 Esquema de posición de las cámaras y del volumen de control. Imagen extraída de (1)	1
Figura 1.3 Posiciones para calibrar el software. Imagen extraída de (1)	2
Figura 1.4 Posiciones para calibrar el software. Imagen extraída de (1)	3
Figura 1.5 Interface del software. En la parte central se ven las imágenes en tiempo real que están captando las cámaras. En la columna izquierda se indica la posición en la que se debe colocar el patrón para ese paso. En la esquina inferior izquierda está el botón Snap para tomar la foto.	3
Figura 2.1 A la izquierda: turbina realizada en un centro de mecanizado de 5 ejes. Imagen extraída de: (34) A la derecha: turbina realizada mediante tecnología ALM. Imagen extraída de: (30)	5
Figura 2.2 Modelo 3D de una rueda dentada. Fuente propia.	6
Figura 2.3 Rueda dentada anterior en formato STL, compuesta de 1540 triángulos. Fuente propia.	6
Figura 2.4 Rueda dentada segmentada en 28 capas. Fuente propia.	7
Figura 2.5 Rueda dentada fabricada mediante tecnología FDM. Fuente propia.	7
Figura 2.6 Esquema de funcionamiento de la estereolitografía. (31)	8
Figura 2.7 Proceso de fabricación mediante SLS. (32)	8
Figura 2.8 Esquema de funcionamiento de máquina FDM. (33)	9
Figura 3.1 Imagen del gestor de diseño. En ella se pueden ver las operaciones que se han realizado, incluidas las que se encuentran suprimidas, en gris.	11
Figura 3.2 Gestor de configuraciones.	12
Figura 3.3 Ruta para abrir el submenú Editar material.	12
Figura 3.4 Proceso para crear un nuevo material.	13
Figura 3.5 A la izquierda: ventana de propiedades del material. A la derecha: ventana de apariencia del material. Se puede escoger el color con el que aparecerá en la ventana de diseño.	13
Figura 3.6 Proceso para agregar a favoritos un material.	13
Figura 4.1 Pantalla de inicio de Slic3r.	14
Figura 4.2 Pantalla de inicio de Repetier-Host.	15
Figura 4.3 Pantalla de inicio de Netfabb.	15
Figura 4.4 Pantalla de inicio de Cura.	16
Figura 4.5 Pantalla de inicio de Simplify.	16
Figura 4.6 A la izquierda: pieza con altura de capa de 0.35mm. Se necesitan 72 capas y 44 minutos. A la derecha: misma pieza con altura de capa de 0.05mm, lo que requiere 496 capas y 4 horas 13 minutos.	17
Figura 4.7 Comparación entre distintos valores de grosor de pared y densidad de relleno. A la izquierda: cuatro líneas de pared y 20% densidad. A la derecha: una línea de pared y 5% de densidad.	

Puede verse el código de colores que utiliza Cura para diferenciar las líneas; amarillo: relleno; verde: pared interior; rojo pared: exterior. 18

Figura 4.8 Comparación entre diferentes valores de ángulos en voladizo permitidos. A la izquierda se permiten ángulos menores de 45° y a la derecha ángulos menores de 70°. 19

Figura 4.9 Mediante la correcta orientación de esta pieza se puede evitar el uso de soportes, lo que disminuye el tiempo de impresión de 51 minutos a 30 minutos. 20

Figura 5.1 Impresora 3D Creality Ender 3 (36) 22

Figura 5.2 Motor paso a paso del eje Y y su final de carrera que marca la posición cero. 23

Figura 5.3 Detalle de la rueda para nivelar la base. 23

Figura 5.4 Diferencia entre extrusión Bowden y extrusión directa (24) 23

Figura 5.5 A la izquierda: detalle del motor de extrusor y del tubo Bowden. A la derecha: detalle del Hot-End y de la boquilla. 24

Figura 5.6 A la izquierda el eje X. A la derecha el eje Y. 24

Figura 5.7 Detalle del eje Z, movido mediante un husillo. 25

Figura 6.1 A la izquierda: perspectiva de la carcasa protectora. A la derecha: tapa trasera para cubrir completamente el patrón, excepto la cara expuesta. 26

Figura 6.2 A la izquierda: pasador para asegurar la tapa de la carcasa. A la derecha: pasador colocado en el muñón de la carcasa. 26

Figura 6.3 A la izquierda: vista frontal de la carcasa junto a la corredera. A la derecha: vista lateral. 27

Figura 6.4 A la izquierda: vista frontal de la carcasa con las cuatro colas de milano. A la derecha: perspectiva de la corredera. 27

Figura 6.5 A la izquierda: patrón colocado en la posición vertical, usando el mástil recto. A la derecha: patrón colocado en la posición inclinado, usando el mástil en ángulo. 28

Figura 6.6 Mástil resultante de la combinación de la geometría de los dos mástiles anteriores. 28

Figura 6.7 Vista lateral en la posición vertical (a la izquierda) y en la posición inclinado (a la derecha) del utillaje 29

Figura 6.8 Despiece del elemento carcasa. 30

Figura 6.9 Pared de la carcasa. 31

Figura 6.10 Marco para sostener el patrón. 31

Figura 6.11 Operación para la construcción del plano auxiliar. 32

Figura 6.12 Croquis para la operación recubrir. A la izquierda el croquis superior, a la derecha el inferior. Las dimensiones del croquis inferior se han obtenido para que el ángulo sea menor de 25°, siendo la altura de 26mm. 32

Figura 6.13 Operación recubrir para crear la base de los muñones. 33

Figura 6.14 Extrusión del croquis con sus dimensiones. 33

Figura 6.15 Operación corte barrido para crear las ranuras donde se alojan los pasadores para fijar la tapa de la carcasa. 34

Figura 6.16 Operación de simetría para crear el otro muñón. 34

Figura 6.17 Perspectivas de la pieza C11 terminada. 35

Figura 6.18 Extrusión de la base a una altura de 2mm.	35
Figura 6.19 Extrusión de cilindro base a una altura de 8mm.	36
Figura 6.20 Extrusión del eje.	36
Figura 6.21 Construcción de los resaltes. A la izquierda: extrusión de uno de ellos desde su croquis. A la derecha: operación matriz circular para construir los restantes.	37
Figura 6.22 Construcción de los orificios. A la izquierda: corte de uno de ellos desde su croquis. A la derecha: operación matriz circular para construir los restantes.	37
Figura 6.23 A la izquierda: extrusión de uno de los orificios desde su croquis hasta una cota de 6mm. A la derecha: construcción de un nervio de refuerzo desde el orificio hasta el cilindro base.	38
Figura 6.24 Simetría para obtener los dos orificios.	38
Figura 6.25 Perspectivas de la pieza terminada.	39
Figura 6.26 A la izquierda: extrusión desde su croquis a una cota de 1mm. A la derecha: perspectiva de la pieza terminada.	39
Figura 6.27 A la izquierda: extrusión desde su croquis a una cota de 1.5mm. A la derecha: perspectiva de la pieza terminada.	40
Figura 6.28 A la izquierda: croquis para realizar la ranura mediante corte por barrido. A la derecha: operación de corte por barrido.	40
Figura 6.29 A la izquierda: diseño gráfico del mástil. A la derecha: dimensiones del mástil.	41
Figura 6.30 Despiece del elemento mástil.	41
Figura 6.31 Extrusión desde su croquis hasta una altura de 5mm.	42
Figura 6.32 A la izquierda: extrusión de la sección del mástil. A derecha: taladro para el eje, realizado por corte seleccionando la opción hasta siguiente.	42
Figura 6.33 Extrusión del cilindro hasta una altura de 10mm.	43
Figura 6.34 A la izquierda: taladro para alojar los imanes con una profundidad de 3mm. A la derecha: construcción de los restantes mediante matriz circular.	43
Figura 6.35 A la izquierda: croquis de sección de la ranura. A la derecha: operación corte por barrido.	44
Figura 6.36 Operación matriz circular para realizar las ranuras restantes.	44
Figura 6.37 Nervio creado con la operación nervio. En la imagen puede verse en azul el croquis para la operación y en amarillo el espesor del nervio, determinado en 3mm.	45
Figura 6.38 Perspectivas de la pieza terminada.	45
Figura 6.39 Extrusión desde su croquis con una altura de 20mm.	46
Figura 6.40 A la izquierda: cola de milano en de la posición vertical. A la derecha: cola de milano de la posición inclinado. Ambas se han realizado por una extrusión de 15mm.	46
Figura 6.41 Estrusión del resalte a una altura de 5mm.	47
Figura 6.42 Perspectivas de la pieza terminada.	47
Figura 6.43 Despiece del elemento corredera.	48
Figura 6.44 Extrusión de la sección de la corredera desde croquis hasta una altura de 30mm.	48
Figura 6.45 Construcción del hueco para la cola de milano con una profundidad de 15mm.	49

Figura 6.46 Extrusión desde el croquis de una de las palancas del sistema de posicionamiento longitudinal, el restante se obtiene por simetría.	49
Figura 6.47 A la izquierda: construcción del resalte mediante una extrusión de 1.5mm desde su croquis. A la derecha: construcción del chaflán en su cara inferior.	50
Figura 6.48 Operación redondeo con radio variable.	50
Figura 6.49 Perspectiva de la pieza terminada.	51
Figura 6.50 Extrusión desde su croquis de la sección de la guía con una longitud de 100mm.	51
Figura 6.51 A la izquierda: construcción de una de las ranuras mediante corte especificando la profundidad hasta siguiente. A la derecha: construcción de las ranuras de un lateral mediante matriz lineal.	52
Figura 6.52 Perspectiva de la pieza terminada, incluyendo la simetría de la matriz lineal.	52
Figura 6.53 Relación de coincidente entre el origen del ensamblaje y el origen de la pieza. Está seleccionada la opción alinear ejes. A la izquierda puede verse el submenú donde se encuentran las relaciones.	53
Figura 6.54 Operación distancia límite. A la izquierda: caras seleccionadas para la operación. A la derecha: parámetros para la operación: distancia actual, valor máximo, valor mínimo.	54
Figura 6.55 Relación de coincidente entre los planos medios de las piezas.	54
Figura 6.56 Elemento corredera y elemento mástil ensamblados	54
Figura 6.57 A la izquierda: relación de concentricidad entre el eje y su agujero. A la derecha: relación de coincidente entre las caras.	55
Figura 6.58 Además de caras y planos, las relaciones de coincidente se pueden establecer también entre aristas y entre puntos. En este caso se han relacionado las aristas para colocar la pieza C14.	55
Figura 6.59 A la izquierda: relación anchura. A la derecha: operación simetría de componentes.	56
Figura 6.60 Perspectivas del ensamblaje terminado. A la izquierda: posición vertical. A la derecha: posición inclinado.	56
Figura 6.61 A la izquierda: interferencias 1 y 3 entre las piezas C13 (simétricas) y C12. A la derecha: interferencia 2 y 4 entre las mismas piezas.	57
Figura 6.62 A la izquierda: lista de interferencias y su valor. A la derecha: interferencia 5: entre pieza C14 y C12.	57
Figura 6.63 Ventana de opciones para los archivos STL.	58
Figura 6.64 Piezas C11 y C12 en su posición de impresión.	59
Figura 6.65 Piezas M11 y M12 en su posición de impresión.	59
Figura 6.66 Pieza CR12 en su posición de impresión.	59
Figura 6.67 Piezas C13 y C14.	60
Figura 6.68 Pieza CR11.	60
Figura 6.69 Perspectivas del utillaje. A la izquierda en posición vertical. A la derecha en posición inclinado.	61
Figura 6.70 A la izquierda: desprendimiento de material en el voladizo sin nervio. A la derecha: pieza M12 con rebaje.	62
Figura 6.71 Analisis cualitativo mediante elementos finitos.	62

Figura 6.72 A la izquierda: grieta a través del plano horizontal de las palancas. A la derecha: fractura causada por la grieta.	63
Figura 6.73 Posición más atrasada sin contar con las palancas de la pieza CR11	63
Figura 6.74 Despiece del elemento carcasa.	64
Figura 6.75 Pieza C21 con las paredes aligeradas.	65
Figura 6.76 Perspectiva de la pieza C21 con sistema de fijación de mayor tamaño.	65
Figura 6.77 Vista frontal de la pieza C21 y de la pieza C22, adaptada a las dimensiones de los muñones. Puede apreciarse el gran tamaño que poseen estas piezas en comparación con el que ocupa el patrón.	65
Figura 6.78 A la izquierda: croquis para construir el hueco donde se alojan las pinzas. A la derecha: perspectiva de la pieza C21 con el nuevo sistema de fijación.	66
Figura 6.79 A la izquierda: croquis de la pieza C23. A la derecha: perspectiva de la pieza C23.	66
Figura 6.80 Vista frontal de la pieza C21 y de la pieza C22 con el nuevo sistema de fijación por pinzas.	67
Figura 6.81 A la izquierda: croquis de la ranura para el sistema de posicionamiento rotacional. A la derecha: perspectiva de la pieza C22.	67
Figura 6.82 Perspectiva de la pieza C22 incluyendo los nervios de refuerzo.	68
Figura 6.83 Perspectiva de la pieza C25.	68
Figura 6.84 Dimensiones del elemento mástil	69
Figura 6.85 Proceso del diseño gráfico del mástil incluyendo las dimensiones de la carcasa.	69
Figura 6.86 Despiece del elemento mástil.	70
Figura 6.87 A la izquierda: croquis para realizar el orificio para el eje. A la derecha: perspectiva de la pieza M21 con el orificio.	70
Figura 6.88 Perspectivas de la pieza M23.	71
Figura 6.89 Vistas de la ranura de la pieza M21 sobre la que desliza la pieza M23.	71
Figura 6.90 Perspectivas de la pieza M21.	72
Figura 6.91 Perspectiva de la pieza M24.	72
Figura 6.92 Análisis mediante elementos finitos. El peso del patrón de calibración se ha trasladado al mástil como una fuerza y un momento.	73
Figura 6.93 Perspectiva de la geometría común de las piezas M22.1 y M22.2, pieza M22	74
Figura 6.94 Operación matriz lineal. Nótese que se usa la misma arista para ambas direcciones.	74
Figura 6.95 Perspectiva de la pieza M25.	75
Figura 6.96 Perspectiva de la pieza M26.	75
Figura 6.97 Despiece del elemento base.	76
Figura 6.98 Operación matriz lineal para realizar los nervios. En la imagen puede verse el Plano 1 en azul, que es donde se realizó el croquis del primer nervio, y el Plano 2 en verde, que sirve como referencia para la matriz.	77
Figura 6.99 Perspectiva de la pieza B21.	77
Figura 6.100 Perspectiva de la pieza B22.	78

Figura 6.101 Patrón para realizar los taladros tanto para la pieza B21 como para la B22.	79
Figura 6.102 Perspectiva de la pieza B23.	79
Figura 6.103 Operación simetría de componentes. En la parte superior derecha del cuadro de opciones pueden verse las flechas que permiten navegar entre los distintos pasos. En la imagen se encuentra en el Paso 2: configuración de la orientación, donde se ha seleccionado la opción Crear versión simétrica. En el Paso 3: Versión simétrica se selecciona la opción Crear configuración derivada en archivos existentes para evitar crear dos archivos de la misma pieza.	80
Figura 6.104 A la izquierda: Pieza M22.1. A la derecha: Pieza M22.2.	81
Figura 6.105 Operación Patrón Circular de componentes.	81
Figura 6.106 Perspectivas del utilaje en su versión 2. A la izquierda en posición vertical y a la derecha en posición inclinado.	82
Figura 6.107 Fallo de falta de adherencia entre capas, presentr en las cuatro esquinas.	83
Figura 6.108 A la izquierda: nuevo diseño con los radios de acuerdo. A la derecha: grietas en las cuatro esquinas.	84
Figura 6.109 A la izquierda: nuevo diseño con los nervios para suavizar la transición hacia el resalte. A la derecha: grietas en las cuatro esquinas.	84
Figura 6.110 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	85
Figura 6.111 Hueco entre la pieza C21 y la C22.	85
Figura 6.112 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	86
Figura 6.113 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	87
Figura 6.114 Resultado de las deformaciones en el análisis por elementos finitos.	87
Figura 6.115 A la derecha: nuevo diseño de la pieza C23. A la derecha: análisis del nuevo diseño bajo las mismas condiciones que el análisis anterior. La escala de deformación en la representación es de 1, por lo que se puede comparar directamente con su forma indeformada.	88
Figura 6.116 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	88
Figura 6.117 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	89
Figura 6.118 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	89
Figura 6.119 Detalle de los “escalones” producidos por la transición entre capas con altura 0.25mm	90
Figura 6.120 Detalle de los “escalones” suavizados.	90
Figura 6.121 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	91
Figura 6.122 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	92
Figura 6.123 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	92

Figura 6.124 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	93
Figura 6.125 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	94
Figura 6.126 A la izquierda: modelo laminado de la pieza, nótese el detalle de los resaltes en líneas verdes, que indica que están realizados por líneas de perímetro. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	95
Figura 6.127 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	95
Figura 6.128 En la figura pueden verse las grietas entre las paredes verticales y el plano horizontal. Sin embargo, la rotura se ha producido por la base de la pieza, no por la grieta.	96
Figura 6.129 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	97
Figura 6.130 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	98
Figura 6.131 A la izquierda: todas las piezas que componen el mástil. A la derecha: mástil ensamblado.	99
Figura 6.132 Detalle del resorte.	99
Figura 6.133 A la izquierda: posición vertical. A la derecha: posición inclinado. Puede verse que en ambas posiciones el utillaje se encuentra perfectamente equilibrado.	100
Figura 6.134 A la izquierda: croquis de la pieza M22. A la derecha: croquis de la nueva pieza M32.	101
Figura 6.135 Radio de acuerdo de la nueva pieza B31.	101
Figura 6.136 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.	102
Figura 6.137 Desviación en el montaje del mástil de la versión 2.	102
Figura 6.138 Desviación en el montaje del mástil de la versión 3.	103
Figura 6.139 Utillaje terminado en su posición vertical y en la inclinada.	103
Figura 7.1 Imagen de las cámaras a su máxima distancia.	104
Figura 7.2 Imagen del utillaje colcafo frente a las cámaras.	104
Figura 7.3 Imagen de la interface con la cruz centrada y alineada en ambas cámaras.	104
Figura 7.4 Posiciones captadas en las pruebas.	105
Figura 8.1 Imagen de herramienta fabricada por Heineken. Imagen obtenida de (29)	107
Figura 8.2 Ejemplo de pieza optimizada topológicamente. Imagen obtenida de (38)	108

1 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es diseñar y fabricar un útil que permita automatizar el proceso de calibración de ARAMIS, que es un sistema de sensores de alta precisión para el análisis en 3D de desplazamientos y deformaciones. En la Escuela se usa para realizar ensayos en chapas metálicas.



Figura 1.1 Imagen de las cámaras del sistema ARAMIS. (37)

Antes de realizar un ensayo, es necesario calibrar el software de ARAMIS en el volumen de control en el que se estima que se deformará la chapa.

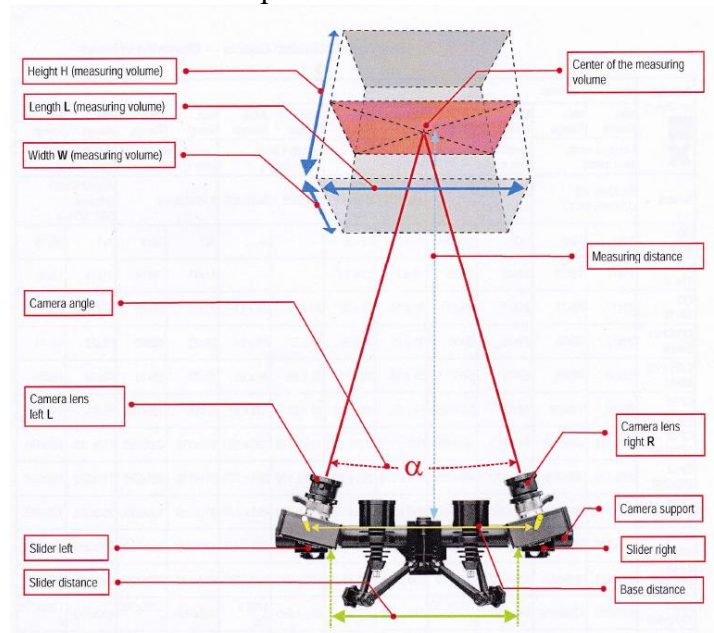


Figura 1.2 Esquema de posición de las cámaras y del volumen de control. Imagen extraída de (1)

Para ello es necesario colocar un patrón en trece posiciones distintas, indicadas por el propio software.



Figura 1.3 Posiciones para calibrar el software. Imagen extraída de (1)

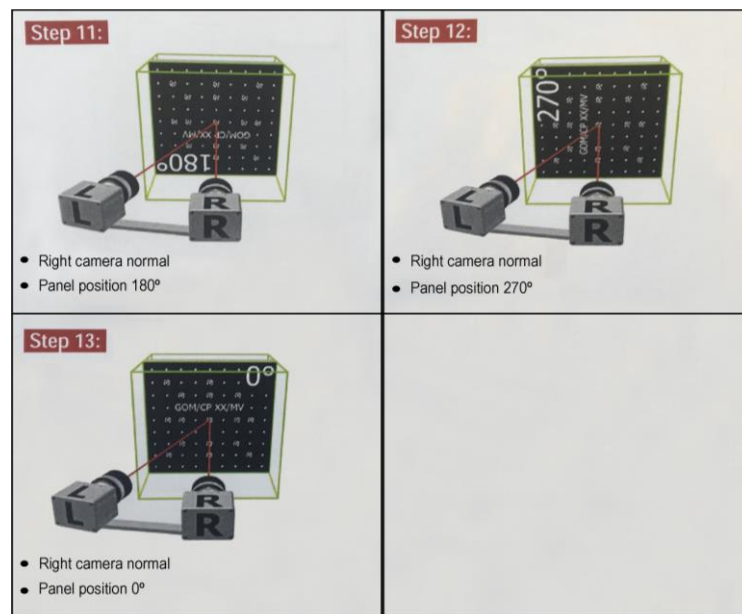


Figura 1.4 Posiciones para calibrar el software.
Imageb extraída de (1)

En cada una de esas posiciones es necesario tomar una foto desde la interfaz del programa. Una vez tomadas las trece fotos el software calcula la desviación de la calibración en píxeles. Para que la calibración sea satisfactoria es necesario que el valor de esa desviación sea inferior a 0.04 píxeles. (1)

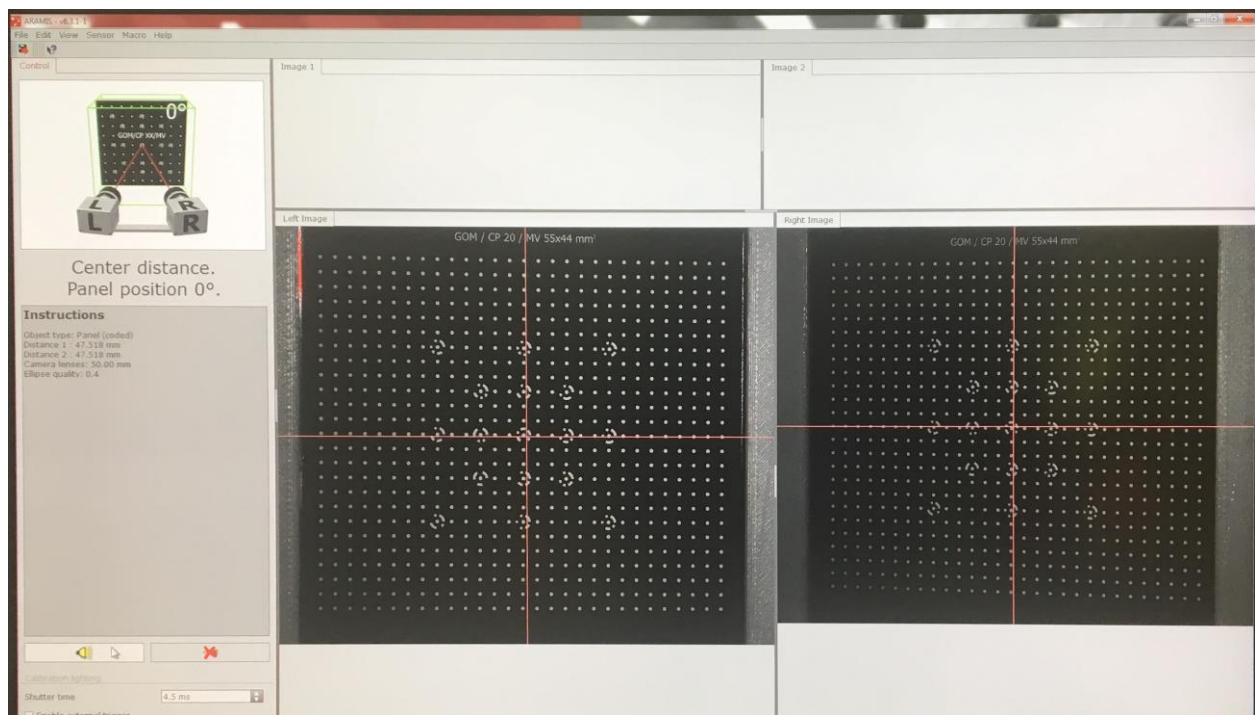


Figura 1.5 Interface del software. En la parte central se ven las imágenes en tiempo real que están captando las cámaras. En la columna izquierda se indica la posición en la que se debe colocar el patrón para ese paso. En la esquina inferior izquierda está el botón Snap para tomar la foto.

Actualmente, el posicionamiento del patrón se realiza sosteniéndolo a mano, lo que hace que la calidad de la calibración y el tiempo empleado en realizarla dependa en gran medida del operador que la realice, ya que el software descarta aquellas fotos en las que no puede distinguir los puntos suficientes, obligando a repetir dicha posición. Otro inconveniente de este método es que se necesitan dos personas para realizar la calibración, una persona que sostenga el patrón y otra que tome las fotos.

Mediante el uso del útil se pretende disminuir el tiempo que se requiere para realizar la calibración y aumentar la precisión de ésta, independientemente de la pericia del operador que la realice. Se ha marcado como objetivo disminuir la desviación en la calibración a la mitad del máximo permitido, es decir, a 0.02 píxeles.

2 FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva o Additive Layer Manufacturing (ALM) es una técnica que consiste en la fabricación de objetos por aportación de material en capas sucesivas, partiendo de un modelo 3D que se genera mediante algún software CAD.

Este proceso es sustancialmente diferente a otros procesos de fabricación consolidados en la industria como son el mecanizado, la forja o la fundición. Mientras que para estas técnicas se necesitan herramientas, matrices o moldes específicos para cada pieza, para la fabricación aditiva sólo se necesita el modelo 3D de la pieza, el programa de laminado y el equipo de fabricación. (2)

La fabricación aditiva presenta las siguientes ventajas: (2)

- Velocidad: las piezas se pueden fabricar en unas horas, dependiendo del tamaño, debido a que no es necesario el diseño y fabricación previas de utillajes para poder realizar la pieza.
- Partes complejas: se pueden crear superficies complejas, incluso piezas interiores a otras piezas.

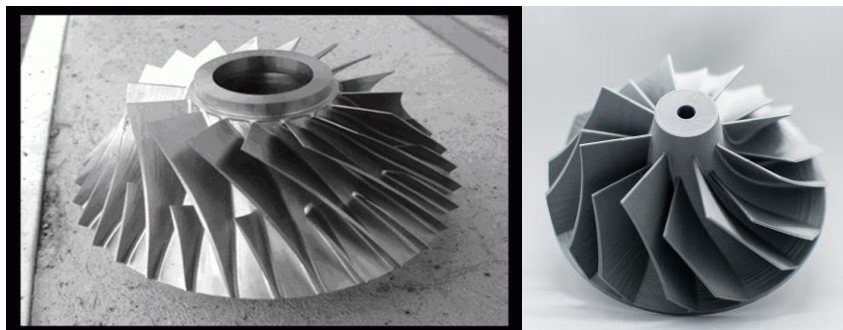


Figura 2.1 A la izquierda: turbina realizada en un centro de mecanizado de 5 ejes. Imagen extraída de: (34) A la derecha: turbina realizada mediante tecnología ALM. Imagen extraída de: (30)

- Tipos de materiales: se puede fabricar con plástico, metal, cerámica, materiales compuestos e incluso papel con propiedades similares a la madera. Además, se pueden hacer piezas con múltiples materiales.

La fabricación aditiva presenta las siguientes desventajas frente a los procesos de fabricación convencionales: (2)

- Piezas grandes: elevado tiempo de fabricación y alto precio del material.
- Alta precisión y buen acabado superficial: Normalmente, las piezas fabricadas por tecnología aditiva requieren procesos secundarios para tener buena precisión y buen acabado superficial.
- Alto volumen de producción: para un gran volumen de producción el coste por pieza del utillaje o moldes que requieren otras tecnologías es insignificante y su tiempo de fabricación es considerablemente menor al tiempo de fabricación mediante tecnología aditiva.
- Propiedades del material: los materiales disponibles para ser usados por esta tecnología son

limitados, por lo que puede que el material que posea las propiedades deseadas no esté disponible. Además, debido al método de fabricación, las propiedades de la pieza final puede que no satisfagan los requerimientos de diseño.

2.1 Pasos del proceso de ALM

Existen diferentes procesos de fabricación aditiva. Cada proceso puede usar diferentes materiales o diferentes técnicas para construir las capas. Sin embargo, todos ellos siguen los siguientes pasos básicos: (2)

1. Crear un modelo 3D de la pieza mediante un programa CAD.

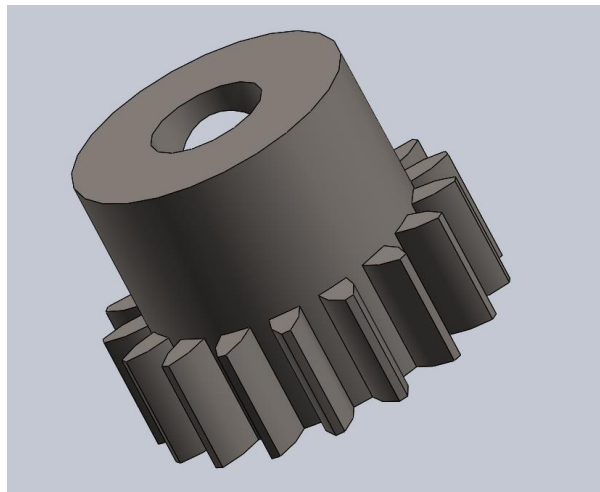


Figura 2.2 Modelo 3D de una rueda dentada. Fuente propia.

2. Convertir el modelo CAD en un modelo STL. El formato STL es un formato de archivo estándar usado en la fabricación aditiva. En estos archivos se representa la superficie del sólido 3D mediante triángulos, almacenando las coordenadas de los vértices y la dirección normal para cada triángulo.

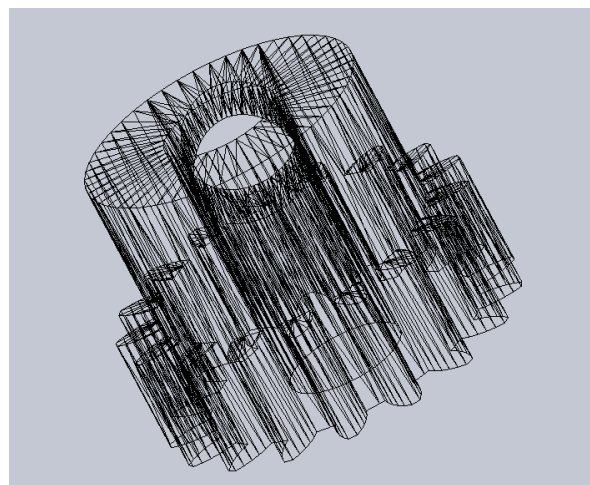


Figura 2.3 Rueda dentada anterior en formato STL, compuesta de 1540 triángulos. Fuente propia.

3. Segmentar (slice) el modelo STL en capas: Se realiza mediante un programa específico. Primero se orienta el objeto dentro del volumen de trabajo de la máquina, lo que influye en parámetros como el tiempo de fabricación, la resistencia y la precisión. Después se segmenta el modelo en delgadas capas a lo largo del plano X-Y. Cada capa será construida secuencialmente a lo largo del eje Z.

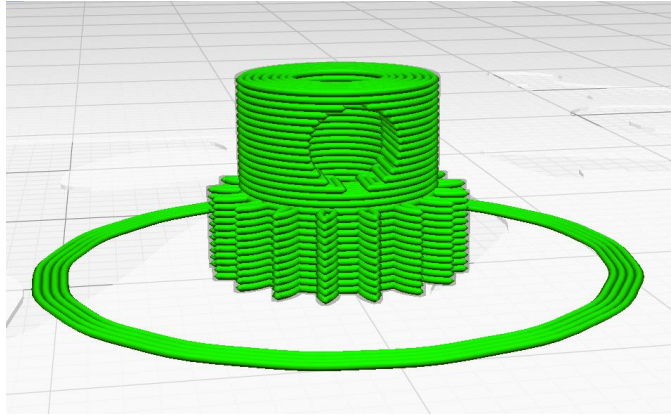


Figura 2.4 Rueda dentada segmentada en 28 capas. Fuente propia.

4. Construir la pieza capa a capa: en este paso se encuentran las mayores diferencias en función de la técnica de fabricación aditiva empleada.
5. Post procesado de la pieza: después de construir la pieza hay que extraerla de la máquina. Si se ha fabricado en un material fotosensible, debe ser curado para alcanzar toda su resistencia.

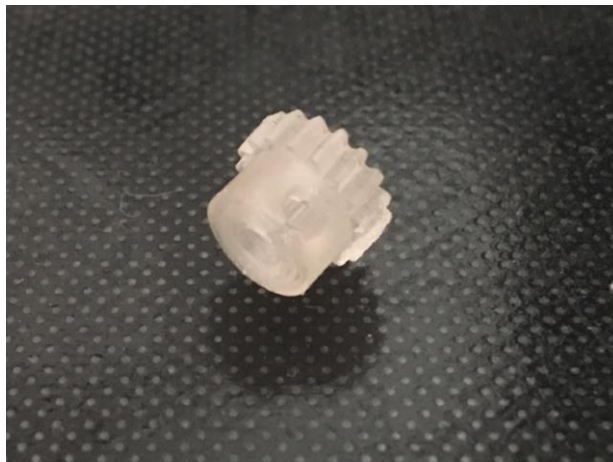


Figura 2.5 Rueda dentada fabricada mediante tecnología FDM. Fuente propia.

2.2 Tecnologías

Las diferentes técnicas de fabricación aditiva pueden clasificarse en función del material empleado: (2)

- Liquid-based processes: normalmente emplea una resina polimérica fotosensible. Para cada capa se cura una porción de resina específica. La más común es la estereolitografía (stereolithography, SLA).

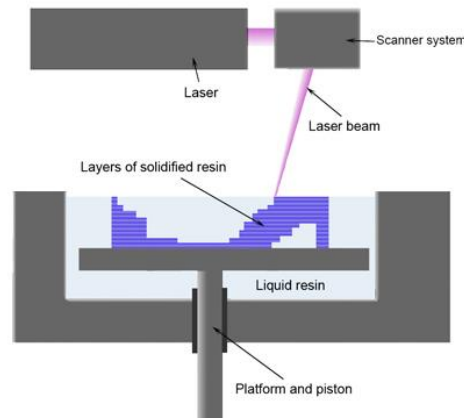


Figura 2.6 Esquema de funcionamiento de la estereolitografía. (31)

- Powder-based processes: en este proceso una porción seleccionada de polvos es sinterizada en cada capa. Los polvos pueden ser metálicos, poliméricos o cerámicos. Entre estas técnicas se encuentra la sinterización selectiva por láser (Selective Laser Sintering, SLS).

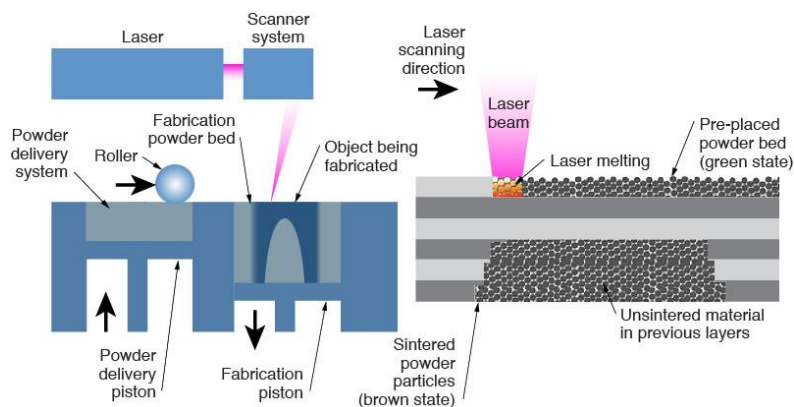


Figura 2.7 Proceso de fabricación mediante SLS. (32)

- Solid-based processes: El proceso más común es la laminación de hojas (Laminated Object Manufacturing, LOM). En él, una fina capa de material se coloca sobre la capa inferior y se corta con la forma de la pieza en esa capa. Otro proceso es el modelado por deposición de material fundido (Fused Deposition Modeling, FDM), en el cual se estruye y deposita el material para crear la capa. Esta es la técnica usada por la impresora 3D con la que se llevará a cabo el proyecto.

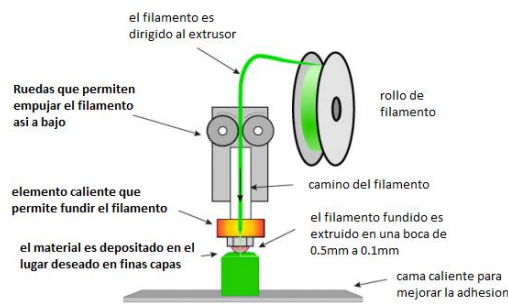


Figura 2.8 Esquema de funcionamiento de máquina FDM. (33)

2.3 Aplicaciones

Las aplicaciones principales de la fabricación aditiva son: (2)

- Prototipos (Rapid prototyping): prototipos para visualización, test de forma y test de funcionalidad.
- Utillajes (Rapid tooling): moldes no permanentes o herramientas que no requieran gran resistencia mecánica, como es el caso de este proyecto.
- Fabricación rápida (Rapid manufacturing): fabricación de piezas finales con geometría compleja.

2.4 Justificación del uso de la tecnología ALM

Este proyecto contiene los tres principales usos de la fabricación aditiva. En primer lugar, se trata del diseño de un nuevo utillaje, por lo que será necesaria la realización de varios prototipos para corregir los defectos. Dicho utillaje no estará sometido a grandes esfuerzos, por lo que no precisará tener gran resistencia mecánica. Por último, se precisa la fabricación de piezas finales, completamente acabadas, pues su cometido es ser una herramienta funcional.

3 PROGRAMA CAD

Los programas de diseño asistido por ordenador (CAD, Computer Aided Desing) se usan para generar modelos, bidimensionales o tridimensionales, con las características de un determinado producto. Los programas CAD también permiten simular el funcionamiento del producto. (3)

Un sistema CAD puede conectarse a un sistema de fabricación controlado por ordenador, lo que se denomina sistema CAD/CAM (CAM, Computer Aided Manufacturing). Los equipos CAM crean los programas que usan las máquinas de control numérico (CNC) para fabricar las piezas. (3)

La futura evolución incluirá la integración aún mayor de sistemas de realidad virtual, que permitirá a los diseñadores interactuar con los prototipos virtuales de los productos mediante la computadora. (3)

3.1 Softwares CAD disponibles en el mercado

En la actualidad se pueden encontrar una gran cantidad de software dedicados al diseño asistido por ordenador, tanto comerciales como software libre. A continuación se muestran los más relevantes:

- AutoCAD: es un software CAD utilizado para el dibujo 2D y el modelado 3D. Fue comercializado por primera vez en 1982. Actualmente es comercializado y desarrollado por la empresa Autodesk. Es un software reconocido a nivel internacional por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo digital de planos de edificios o la recreación de imágenes en 3D. AutoCAD es usado por arquitectos, ingenieros y diseñadores industriales. (4)
- Catia: es un programa de diseño, fabricación e ingeniería asistida por ordenador comercializado por Dassault Systemes. Fue desarrollado en 1971 por la empresa francesa Avions Marcel Dassault, dedicada al sector aeronáutico. Actualmente se usa en industrias como la automovilística, en empresas como BMW, Renault, Toyota, grupo Volkswagen entre otras, la industria naval, el sector aeronáutico, en compañías como Boeing o Airbus y en empresas de equipamiento industrial como ABB y de alta tecnología como Nikon. (5)
- SolidWorks: es un software de diseño CAD 3D para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. Ofrece un amplio abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto. Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño. La primera versión fue lanzada en 1995 y en 1997 fue adquirido por Dassault Systemes convirtiéndose en filial de ésta. (6)
- Solid Edge: es un sistema completo para el desarrollo de productos, desde su diseño y simulación, hasta la fabricación, publicación de documentación técnica, administración de datos, etc. Se trata de un sistema de diseño 3D que utiliza tecnología síncrona para acelerar el diseño, hacer revisiones más rápido, y permitir una mejor reutilización. Es comercializada por SIEMENS PLM. (7)
- FreeCAD: es un software CAD 3D paramétrico de código abierto. Está orientado al diseño mecánico y diseño de productos. FreeCAD presenta herramientas similares a Catia, Solid

Works o Solid Edge. El proyecto FreeCAD fue iniciado en 2001 y es mantenido y desarrollado por una comunidad de voluntarios. Este software es una buena alternativa para todos aquellos que quieran iniciarse en el mundo del modelado e impresión 3D y no dispongan de licencias para programas comerciales. (8)

La elección de SolidWorks de entre los programas mencionados en el apartado anterior tiene un fuerte componente personal. Tanto Catia como SolidWorks son una buena elección para realizar este proyecto. Sin embargo, la decisión de usar SolidWorks viene condicionada por la aspiración de usar un programa distinto al que normalmente se usa en los trabajos realizados en la Escuela, Catia. De esta forma, este trabajo pretende ser, además, una pequeña guía con los aspectos básicos para manejar Solid Works.

3.2 Introducción a SolidWorks

SolidWorks utiliza un entorno gráfico basado en Windows, intuitivo y fácil de manejar. Las herramientas de diseño en SolidWorks están organizadas en tres módulos: Pieza, Ensamblaje y Dibujo. Además, posee herramientas de productividad, de gestión de proyectos, de presentación y de análisis y simulación. (9)

En el módulo pieza se realiza el modelado en 3D de un único componente del diseño. El montaje de las distintas piezas se lleva a cabo en el módulo ensamblaje. Es este módulo se insertan cada una de las piezas y se le asignan las relaciones geométricas de posición para definir tridimensionalmente el ensamblaje. Finalmente, en el módulo dibujo se generan los planos de una pieza o un ensamblaje. (9)

Un elemento importante de la interface es el gestor de diseño, también conocido como árbol de operaciones o FeatureManager. En él se incluyen de forma ordenada todas las operaciones que han sido necesarias realizar para generar una pieza o un ensamblaje. El gestor de diseño permite visualizar u ocultar operaciones, suprimirlas o eliminarlas, cambiar el color o modificar sus parámetros de definición. (9)

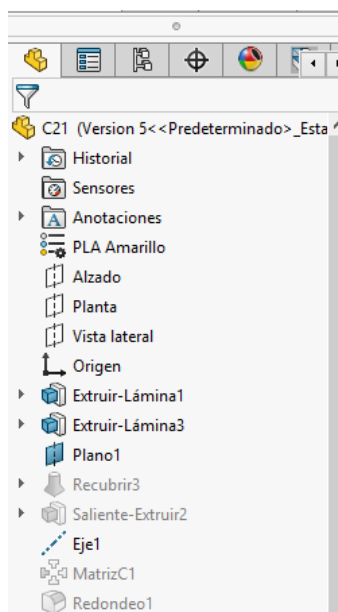


Figura 3.1 Imagen del gestor de diseño. En ella se pueden ver las operaciones que se han realizado, incluidas las que se encuentran suprimidas, en gris.

Se recomienda al lector interesado en aprender más sobre SolidWorks consultar la bibliografía (9).

SolidWorks permite crear diferentes configuraciones para una misma pieza. Esto es útil por ejemplo a la hora de crear piezas simétricas en los ensamblajes o ligeras modificaciones a una pieza sin borrar la versión anterior. Crear una nueva configuración nos permite no tener que crear una pieza nueva, lo que facilita el montaje en grandes ensamblajes. Cuando creamos una nueva configuración partimos del estado de la pieza en ese momento. Si necesitamos deshacer una de las operaciones anteriores debemos suprimir esa operación, no eliminarla. La diferencia entre ellas es que al eliminar una operación la borramos del árbol de operaciones, por lo que se elimina de todas las configuraciones de la pieza. Sin embargo, si la suprimimos solo se borra la operación en esa configuración, apareciendo en gris en el árbol de operaciones, y conservándose en las demás configuraciones. Del mismo modo, las operaciones que se realicen en la nueva configuración aparecerán como suprimidas al volver a la configuración anterior, por lo que no se habrá realizado ningún cambio sobre ella. Las operaciones suprimidas se pueden activar para que se realicen en esa configuración. Es importante resaltar que si se modifica alguna operación que permanezca activa en varias configuraciones se modificará para todas ellas.

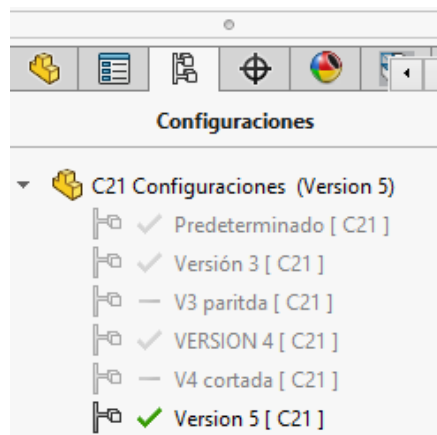


Figura 3.2 Gestor de configuraciones.

Durante la realización del proyecto se hicieron varios análisis mediante elementos finitos a distintas piezas. Es importante resaltar que el modelo usado en el análisis es sustancialmente distinto a la constitución real de las piezas, por lo que el resultado numérico de estos posee un gran error. Principalmente se han usado para conocer cuál es la distribución de tensiones en la pieza y así poder optimizar la geometría de las piezas y los parámetros de impresión. Además, el hecho de poder disponer de la pieza real, ha permitido dotar de cierta veracidad a los resultados de los análisis de elementos finitos de forma empírica.

Para poder realizar un análisis mediante elementos finitos en Solid Works se necesita asignar el material al modelo. Esto se realiza desde el FeatureManager, en el submenú Editar material.

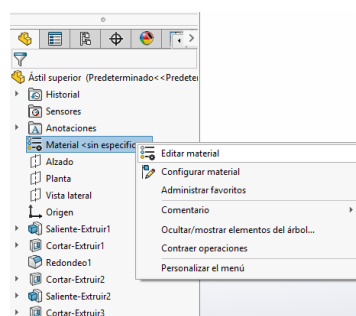


Figura 3.3 Ruta para abrir el submenú Editar material.

El PLA no está incluido en la biblioteca de materiales, por ello es necesario crearlo. En primer lugar, hay que crear una nueva categoría en Materiales personalizados que se denominará PLA. Dentro de esta categoría se crea un Nuevo material.

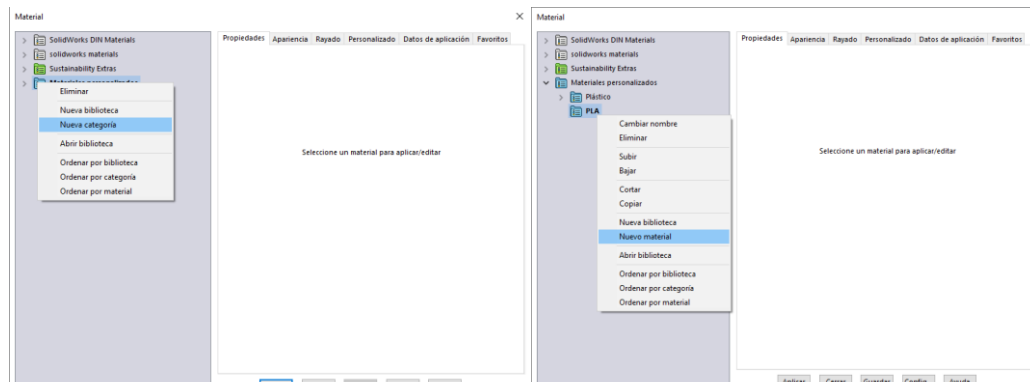


Figura 3.4 Proceso para crear un nuevo material.

Al crear el material se abre una ventana donde se especifica el nombre del material y sus propiedades. Debido a la gran complejidad que poseen las piezas realizadas mediante DFM, así como la cantidad de parámetros que pueden variar como la altura de capa, la densidad de relleno o el grosor de la pared, se decidió modelar el material como isotrópico elástico lineal. Esto provoca que el modelo no esté adaptado a la realidad, pero cumple con el propósito indicado anteriormente.

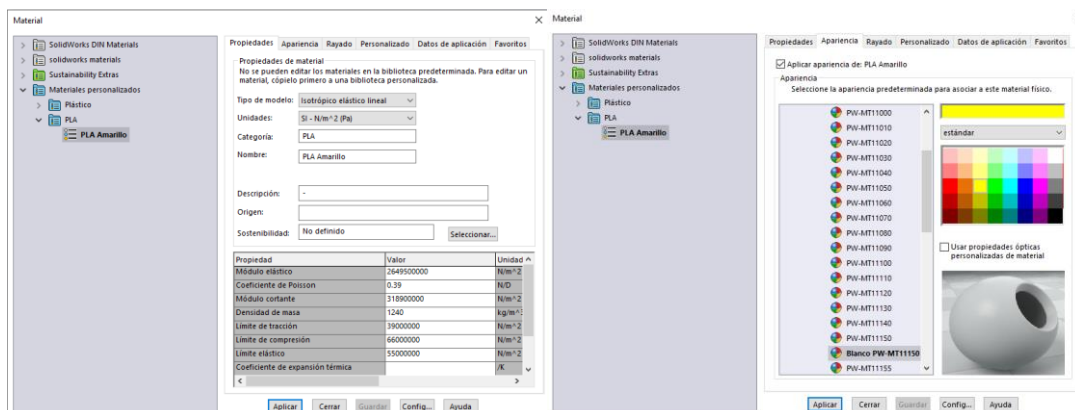


Figura 3.5 A la izquierda: ventana de propiedades del material. A la derecha: ventana de apariencia del material. Se puede escoger el color con el que aparecerá en la ventana de diseño.

Para mayor rapidez a la hora de asignar el material a los modelos se añade a favoritos. De esta forma estará disponible desde el FeatureManager.

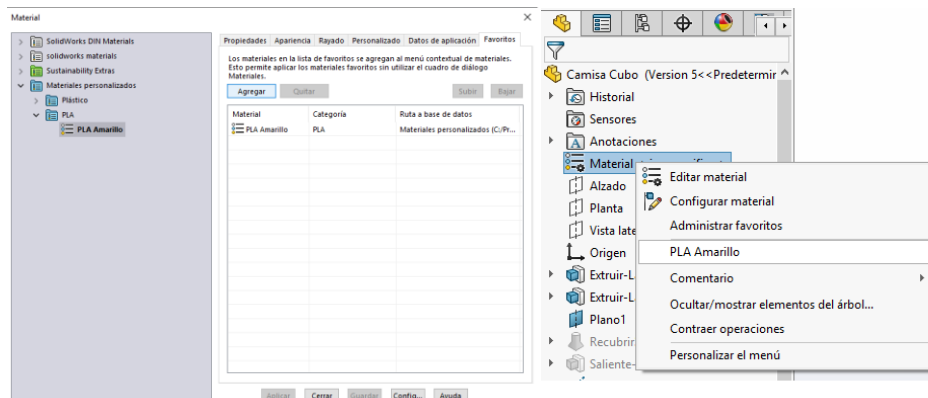


Figura 3.6 Proceso para agregar a favoritos un material.

4 PROGRAMA SLICER

La traducción literal de slicing software es programa de corte. Este programa convierte un objeto 3D en formato STL a una serie de instrucciones para la impresora en formato g-code. El archivo g-code contiene todos los comandos necesarios para construir el objeto. Estos comandos están escritos en el lenguaje de programación G, de amplio uso en control numérico. (10)

En primer lugar, el programa divide el objeto en delgadas capas. Seguidamente, describe estas capas como movimientos lineales del extrusor de la impresora 3D. Estos movimientos junto con otras especificaciones como la temperatura del extrusor y de la cama caliente están contenidos en el archivo g-code que se transfiere a la impresora. (11)

4.1 Softwares disponibles en el Mercado

A continuación, se lista una muestra de los distintos softwares disponibles:

- Slic3r: es un programa de corte de código abierto. Incluye características avanzadas a partir de las cuales otros programas de código abierto han ido evolucionando. (12)

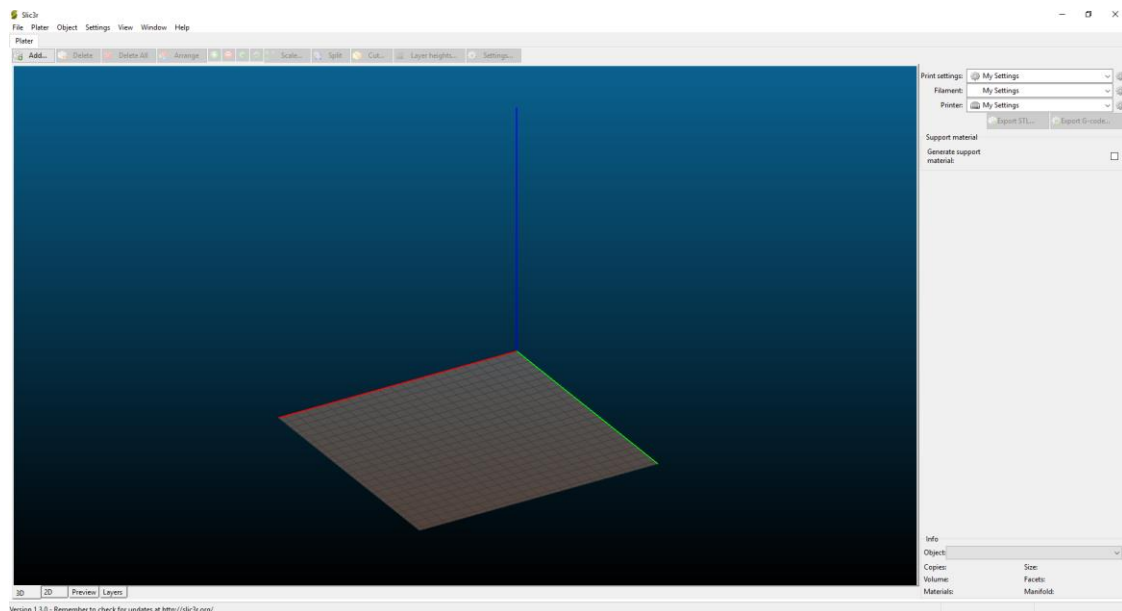


Figura 4.1 Pantalla de inicio de Slic3r.

- Repetier-Host: es un programa de código abierto que permite controlar las impresoras 3D y cortar archivos STL. Ofrece soporte para impresoras con varios extrusores (hasta 16) y permite el acceso remoto a través del servidor Repetier para controlar la impresora desde el navegador. (12)

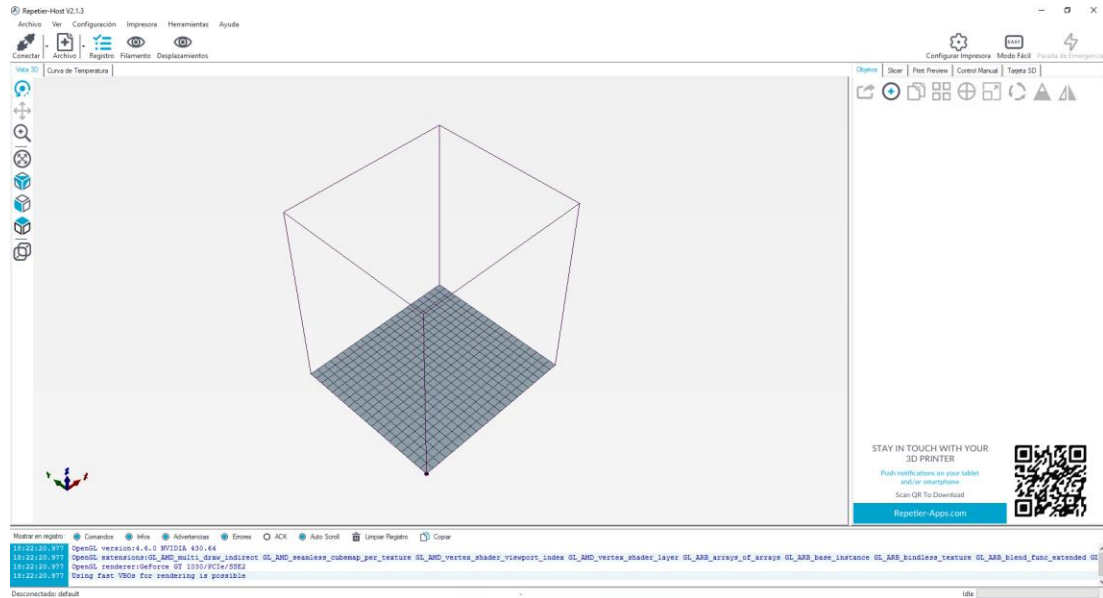


Figura 4.2 Pantalla de inicio de Repetier-Host.

- Netfabb: es un programa de corte comercializado por Autodesk. Cuenta con características avanzadas de análisis y reparación de archivos STL, lo que permite arreglar un modelo antes de proceder a cortarlo. (12)

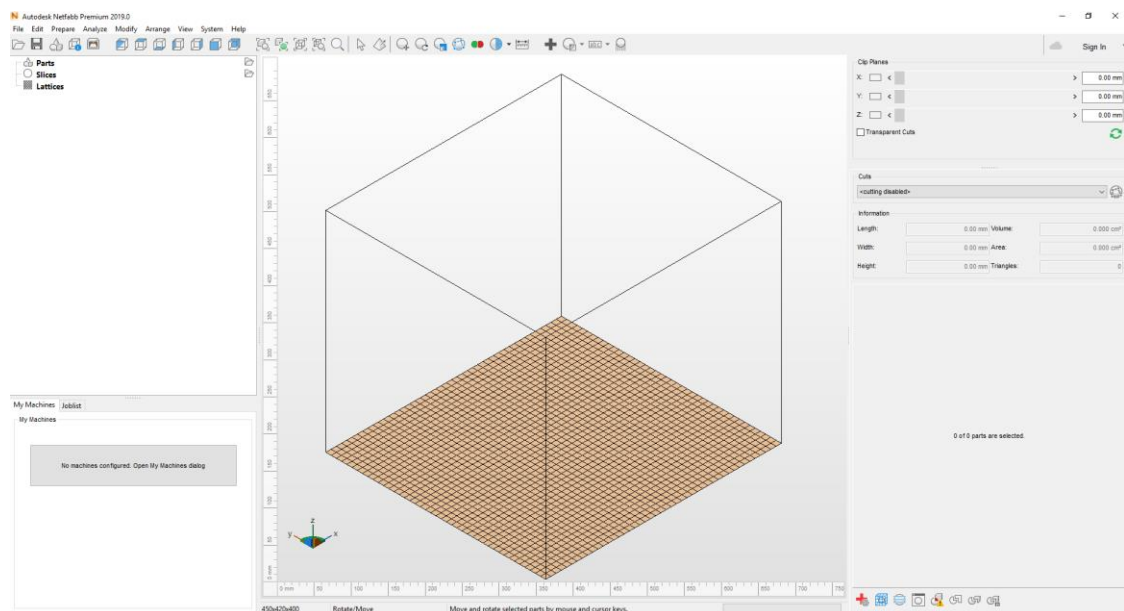


Figura 4.3 Pantalla de inicio de Netfabb.

- Cura: es un programa de código abierto propiedad de Ultimaker. Permite administrar los ajustes de impresión de forma sencilla, estando muchos de ellos preconfigurados por defecto. (12)

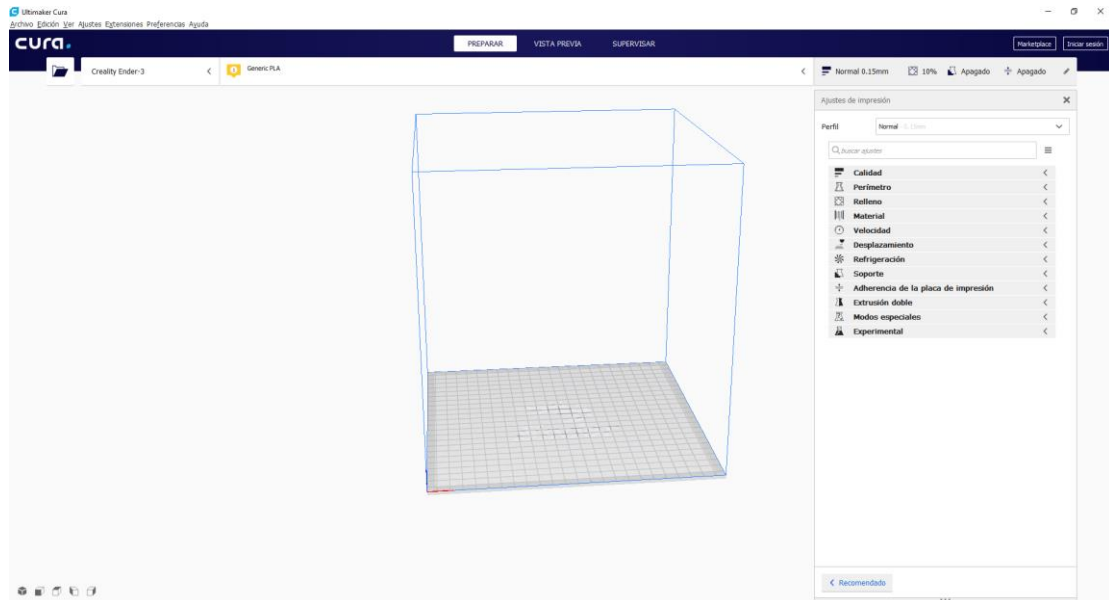


Figura 4.4 Pantalla de inicio de Cura.

- Simplify 3D: es un programa de corte compatible con prácticamente todas las impresoras 3D. Se puede descargar e importar el perfil de la impresora 3D para tener los ajustes preconfigurados. Permite editar G-code y scripts. (13)

El software elegido para realizar la segmentación de las piezas es Ultimaker Cura. La principal razón por la que se escogió este programa fue porque cuenta con una lista de impresoras, entre la que se

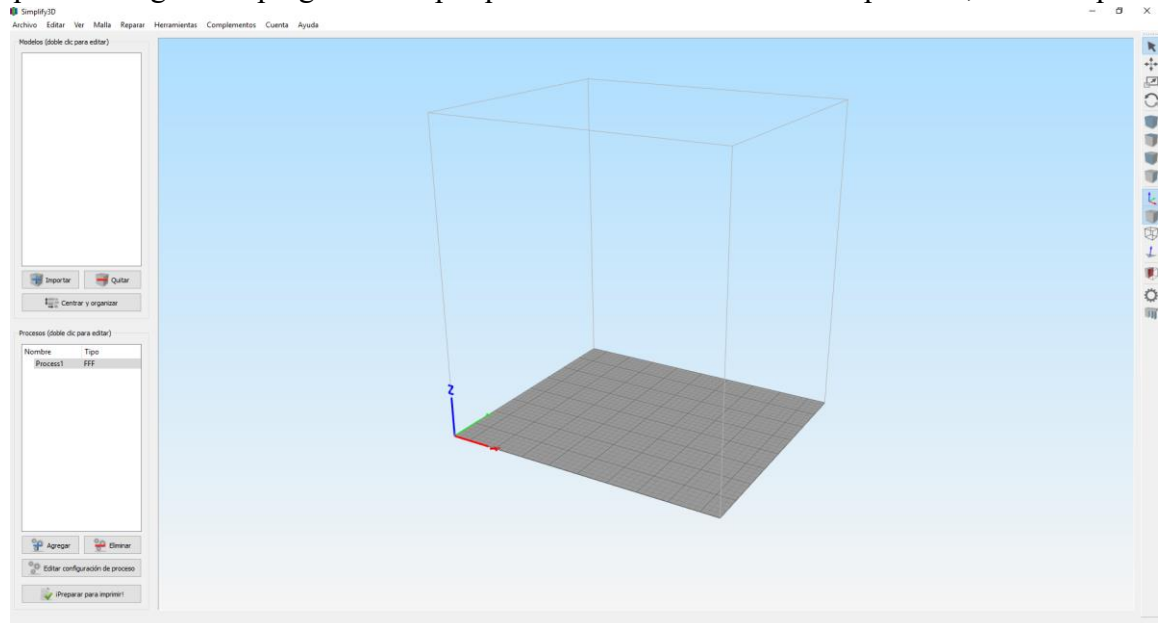


Figura 4.5 Pantalla de inicio de Simplify.

encuentra la utilizada en este proyecto, para configurar las opciones del programa acorde a la impresora seleccionada. Esto se puede hacer durante la instalación del programa o una vez instalado, en ajustes, impresora, agregar impresora.

4.2 Introducción a Ultimaker Cura

El programa Cura en la versión v4.0.0 tiene un total de 395 funcionalidades para configurar la impresora 3D, agrupadas en diferentes grupos. Sin embargo, tiene tres perfiles predefinidos (basic, advanced y expert) en los que se muestran distintas opciones dependiendo de la experiencia del usuario. Para realizar la segmentación de las piezas se ha usado las opciones del perfil advanced. (14)

A continuación, se listan una serie de parámetros que se han modificado respecto a los valores que venían por defecto, todos ellos extraídos de (14):

- Calidad: determina la calidad de la impresión modificando las opciones del tamaño de capa. Cuanto más delgadas sean las capas, menos se notarán, pero aumentará el tiempo de impresión.
 - Altura de capa: es el parámetro principal que se modifica. Su valor suele establecerse en torno a la mitad del diámetro de la boquilla. De este parámetro depende sensiblemente el tiempo de impresión y el número de capas para realizar la pieza.

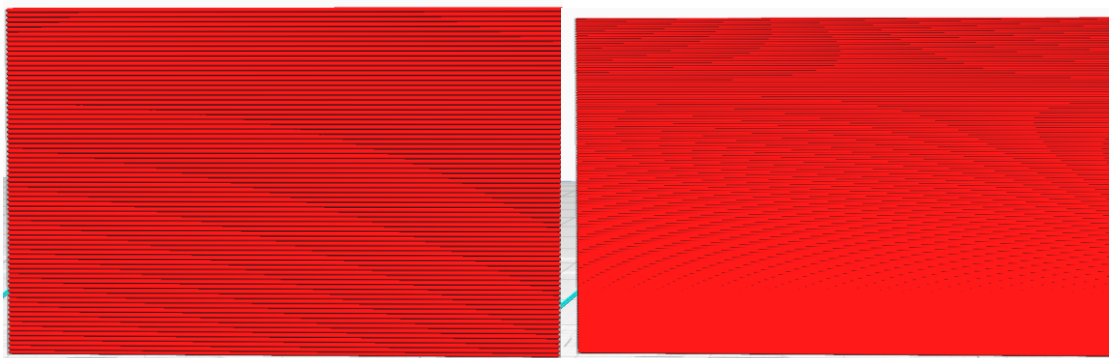


Figura 4.6 A la izquierda: pieza con altura de capa de 0.35mm. Se necesitan 72 capas y 44 minutos. A la derecha: misma pieza con altura de capa de 0.05mm, lo que requiere 496 capas y 4 horas 13 minutos.

- Perímetro: determina las propiedades de la carcasa de la pieza. La pieza es semihueca por dentro, pero el perímetro es sólido. Cuantas más líneas tenga la carcasa más robusta será la pieza, pero tardará más tiempo en imprimirse y se aumentará la cantidad de material usado.
 - Grosor de la pared: determina el espesor de la carcasa. Se puede especificar el valor de deseado o el número de líneas de pared, en cuyo caso, el valor de dicho espesor se obtiene de multiplicar el número de líneas por el diámetro de la boquilla.
 - Grosor superior/inferior: es el mismo concepto que el anterior solo que para el “techo” y “suelo” de la pieza. En este caso el espesor no depende del diámetro de la boquilla, sino de la altura de capa.
- Relleno: determina la cantidad de relleno de la pieza y el patrón con el que se formará este. Cuanto más relleno más robusta será la pieza. El relleno también sirve como apoyo para realizar la parte superior (“techo”) de la pieza, por lo que un relleno insuficiente puede ocasionar desprendimientos del material al realizar esa parte.
 - Densidad de relleno: determina el porcentaje de relleno de la pieza.
 - Pasos de relleno necesarios: define el número por el que será dividido la densidad de relleno para capas lejanas a la parte superior de la pieza. Si el valor de la densidad de relleno es del 30% y el valor de este parámetro es 2, las capas inferiores lejanas a la parte superior tendrán relleno del 15%. Conforme se vaya acercando la superficie superior, el valor de la densidad de relleno irá aumentando hasta llegar al 30%. Esta es

una solución al problema del desprendimiento de la superficie superior sin que conlleve un excesivo aumento del tiempo de impresión.

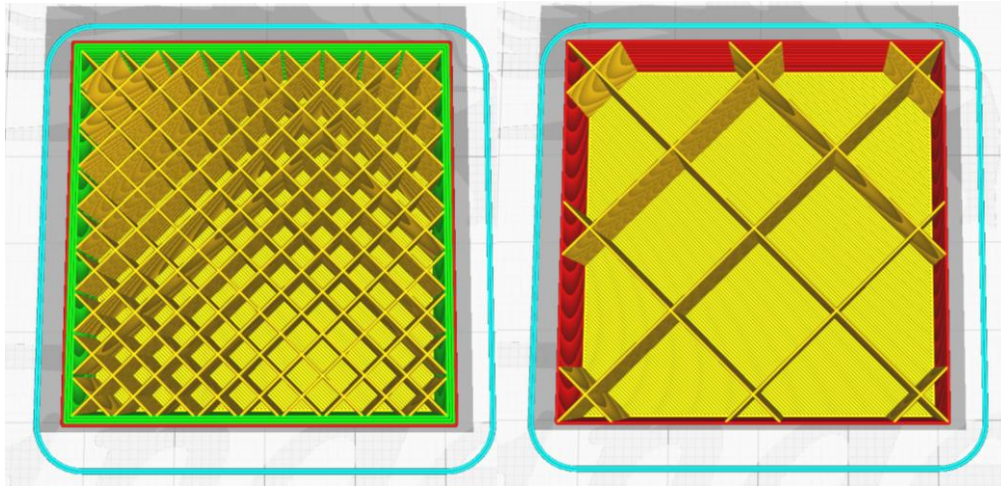


Figura 4.7 Comparación entre distintos valores de grosor de pared y densidad de relleno. A la izquierda: cuatro líneas de pared y 20% densidad. A la derecha: una línea de pared y 5% de densidad. Puede verse el código de colores que utiliza Cura para diferenciar las líneas; amarillo: relleno; verde: pared interior; rojo pared: exterior.

- **Material:** determina los parámetros de impresión relativos al filamento utilizado.
 - Temperatura de impresión: temperatura a la cual se fundirá el plástico durante el proceso de impresión. Viene determinada por el fabricante.
 - Temperatura de la cama caliente: la cama caliente sirve para que el plástico no se enfríe bruscamente y se deforme o se despegue de ella.
 - Diámetro: se refiere al diámetro real del filamento. Puede ocurrir que el diámetro real del filamento sea diferente al diámetro especificado por el fabricante.
 - Flujo: sirve para ajustar la cantidad de filamento que se extruye.
 - Retracciones: habilita la retracción del filamento. Esto evita la formación de hilos cuando la boquilla viaja sin extruir.
- **Velocidad:** se define la velocidad de impresión. Cura calcula la velocidad de extrusión del material en función de la velocidad de desplazamiento de la boquilla.
 - Velocidad de impresión: es la velocidad a la que la impresora 3D realizará los movimientos cuando se esté extruyendo material. Al aumentar la velocidad se disminuye la precisión y es necesario aumentar la temperatura de impresión para que el material fluya mejor.
 - Velocidad de desplazamiento: velocidad a la que la impresora 3D realizará los movimientos cuando no se extruya material.
- **Refrigeración:** este parámetro controla en ventilador de capa en el caso de que la impresora disponga de él. Este ventilador expulsa aire hacia la boquilla para conseguir una rápida solidificación del material. Es un parámetro importante en el caso de imprimir piezas pequeñas, para que el plástico este solidificado cuando se tiene que imprimir la capa superior, e imprimir voladizos, ya que si solidifica rápido no se desprende.

- Soporte: son necesarios para imprimir voladizos. Esta función varía las propiedades de estas subpiezas impresas para sostener la pieza principal y que son retiradas al finalizar.
 - Generar soportes: habilita la creación de soportes. Los soportes es mejor evitarlos si es posible, ya que aumenta el tiempo de impresión, el desperdicio de material y se origina un mal acabado superficial en el área de contacto con la pieza. Por lo general, si la inclinación es menor que 45° (15) se pueden evitar.
 - Colocación del soporte: se puede elegir si colocar los soportes sólo desde la base o incluir soportes también en el interior de la pieza, por ejemplo, para poder crear un taladro en el interior.

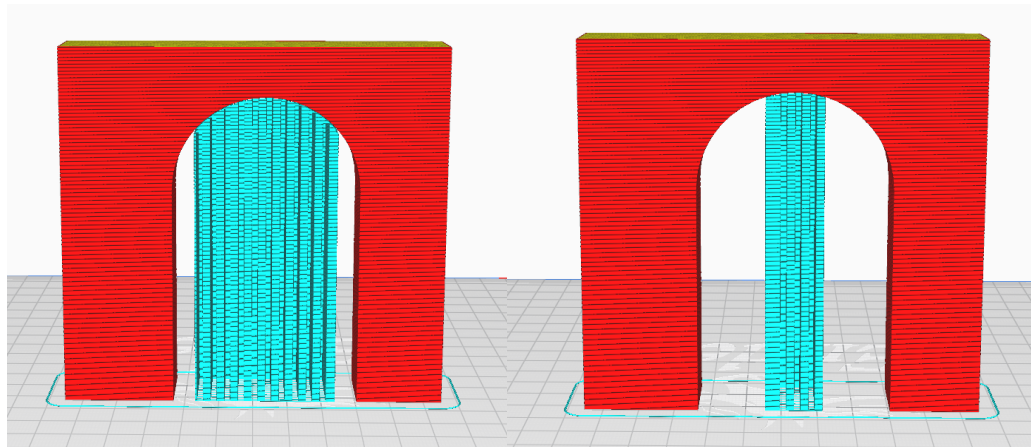


Figura 4.8 Comparación entre diferentes valores de ángulos en voladizo permitidos. A la izquierda se permiten ángulos menores de 45° y a la derecha ángulos menores de 70° .

- Adherencia a la placa de impresión: en este parámetro se pueden escoger tres formas distintas de adhesión:
 - Falda: consiste en unas líneas que traza alrededor de la pieza separadas una cierta distancia. Sirve para eliminar el aire que pueda haber en la boquilla como consecuencia del goteo del material durante el proceso de calentamiento. Esto no mejora la adhesión a la placa.
 - Borde: crea una lámina plana alrededor de la base de la pieza para aumentar la superficie de adhesión e impedir que se deforme.
 - Balsa: crea un soporte sobre el que imprime la pieza. Se consigue mayor adhesión que con Borde. Se usa para piezas irregulares sin caras planas.
- Experimental: habilitar la opción utilizar capas de adaptación. Esta calcula la altura de las capas en función de la geometría del modelo.

Una vez realizados estos ajustes, se puede empezar a preparar las piezas para la impresión. Para ello se abre el archivo STL de la pieza para que aparezca dentro del volumen de trabajo. Una vez ahí, se puede colocar u orientar de la forma más óptima posible en función del tiempo de impresión, la dirección principal en la que se le aplicará la carga o para evitar la necesidad de incluir soportes. Para ello se usan las herramientas desplazar y rotar.

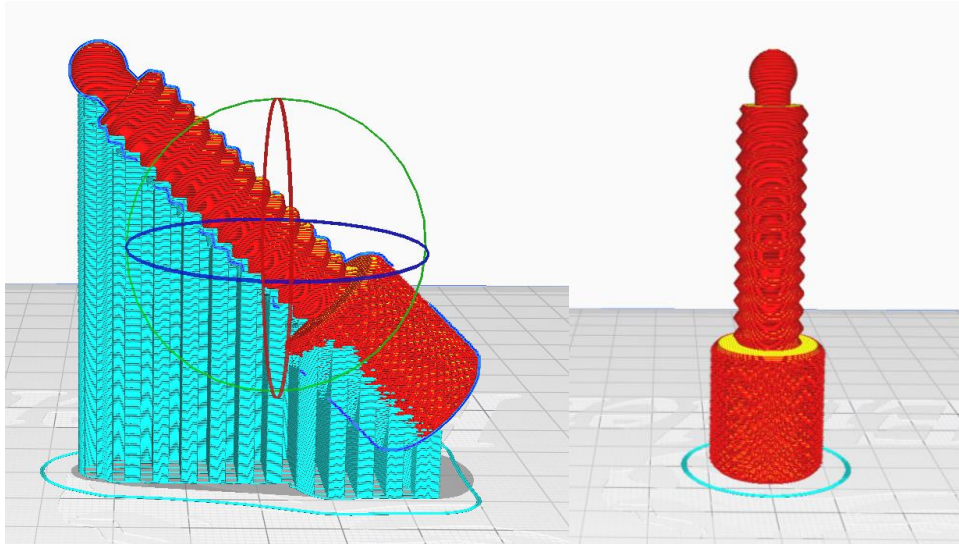


Figura 4.9 Mediante la correcta orientación de esta pieza se puede evitar el uso de soportes, lo que disminuye el tiempo de impresión de 51 minutos a 30 minutos.

Para terminar, se pulsa sobre segmentación y se obtiene el archivo G-code.

5 IMPRESIÓN 3D

Las impresoras 3D son máquinas que tienen la capacidad de realizar copias de diseños con volumen a partir de un diseño previo. Las impresoras 3D domésticas están basada en la tecnología FDM (Fused Deposition Modeling). (16)

Las máquinas de modelado por deposición fundida son máquinas de control numérico computarizado, cuya herramienta a controlar es el extremo de una boquilla. (17)

En esta técnica, el material plástico es extruido a través de la boquilla, la cual dibuja la sección transversal de la pieza, sobre el plano xy, capa a capa. La boquilla contiene una resistencia eléctrica que mantiene el material a la temperatura de fusión para que este fluya fácilmente a través de la boquilla y forme las capas. El material endurece rápidamente una vez que abandona la boquilla. Una vez acabada la capa, la boquilla es deslizada en dirección z un determinado intervalo, denominado altura de capa, para crear la siguiente capa. La altura máxima de una capa está condicionada por el diámetro de la boquilla. (18)

Las piezas construidas con esta tecnología son compuestos ortotrópicos¹ de filamentos poliméricos enlazados entre sí. (17)

5.1 Historia de las impresoras 3D

Aunque no se puede concretar exactamente el nacimiento de la impresión 3D, se puede destacar el año 1984, en el cual Charles Hull, cofundador de 3D Systems, desarrolló la estereolitografía.

En el año 1988, Carl Deckard, de la Universidad de Texas, presentó la patente de la tecnología de sinterizado selectivo por láser.

En ese mismo año también se desarrolló la tecnología Fused Deposition Modeling. Fue creada por Scott Crump, cofundador de Stratasys.

La popularización de la impresión 3D vino de la mano del movimiento Rep-Rap, fundado por el Doctor Adrian Bowyer. Este proyecto de código abierto surgió en 2004. Su propósito era la construcción de impresoras 3D capaces de autorreplicarse. (19)

En 2005, la primera versión de la impresora 3D de Rep-Rap, RepRap Darwin, consigue imprimir la mitad de las piezas de las que se compone. (20)

La segunda versión es la Prusa Mendel. Fue creada en octubre de 2009. Esta cuenta con un área de impresión más grande, mejor eficiencia en los ejes, ensamblaje más simple y es más ligera. (21)

La tercera versión es la Prusa i3. Se lanzó en mayo de 2012. Se rediseñó cambiando la estructura de bastidor de varilla roscada triangular por un marco de perfiles aluminio. El diseño se centró en la

¹ "Propiedad que poseen algunos materiales anisótropos en los que es posible identificar tres direcciones ortogonales, habitualmente asociadas a planos cristalinos, tales que en dos de estas direcciones las propiedades asociadas al comportamiento mecánico, alcanzan los valores máximos y mínimos de entre todas las direcciones posibles." (35)

facilidad de construcción y uso en lugar de maximizar el número de componentes auto replicados. (22)

5.2 Impresora 3D del proyecto

Para la realización de este proyecto se ha utilizado el modelo de impresora Ender 3 de la marca Creality. Esta impresora cuenta con una estructura basada en la Prusa i3.



Figura 5.1 Impresora 3D Creality Ender 3 (36)

Las especificaciones técnicas de esta impresora se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 5.1 Ficha técnica de la impresora Creality Ender 3 (23)

Volumen de impresión	220*220*250mm
Diámetro del filamento	1.75mm
Altura de capa	0.1-0.4mm
Diámetro de la boquilla (nozzle)	0.4mm
Presición	+/-0.1mm
Temperatura máxima del nozzle	255°C
Temperatura máxima cama caliente	110°C

El posicionamiento de la boquilla y de la cama caliente se realiza mediante motores paso a paso. La coordenada cero o “home” se determina mediante tres finales de carrera colocados en cada eje.

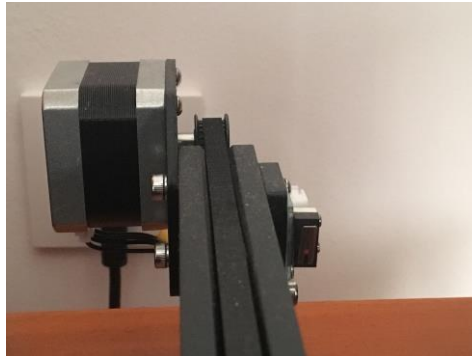


Figura 5.2 Motor paso a paso del eje Y y su final de carrera que marca la posición cero.

La nivelación de la cama caliente se realiza de manera manual mediante cuatro ruedas colocadas en sus esquinas.

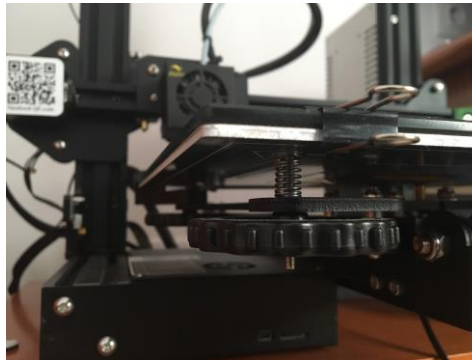


Figura 5.3 Detalle de la rueda para nivelar la base.

Esta impresora es tipo Bowden, es decir, el motor de empuje del filamento está colocado sobre la estructura de la impresora y no junto a la boquilla. El filamento es guiado hacia el hot-end mediante un tubo de PTFE. La principal ventaja de este sistema es la reducción del peso de las partes móviles, lo que permite aumentar la velocidad de impresión. El principal inconveniente es que es más propenso a los atascos, sobre todo con filamento flexible. (24)

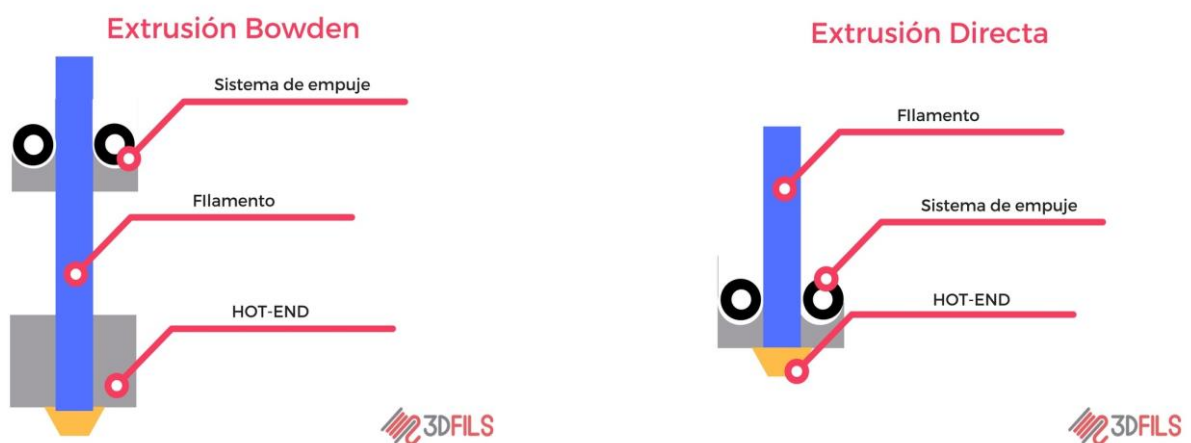


Figura 5.4 Diferencia entre extrusión Bowden y extrusión directa (24)

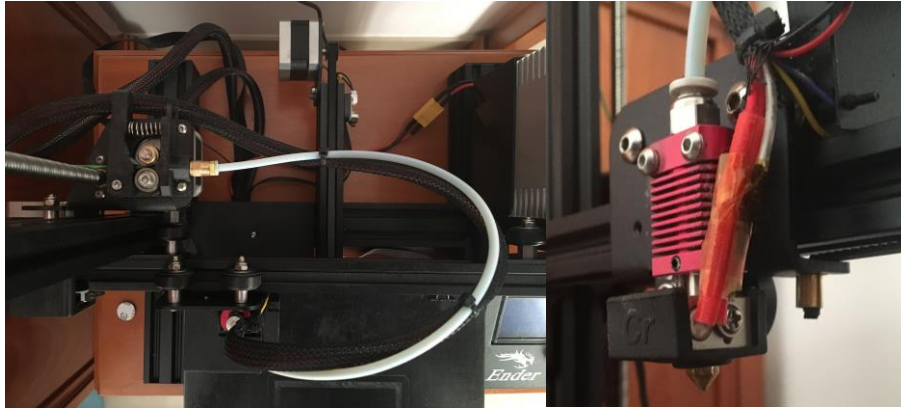


Figura 5.5 A la izquierda: detalle del motor de extrusor y del tubo Bowden. A la derecha: detalle del Hot-End y de la boquilla.

El movimiento en la dirección X lo realiza la boquilla por medio de una correa. El movimiento en la dirección Y lo realiza la cama caliente también mediante una correa.

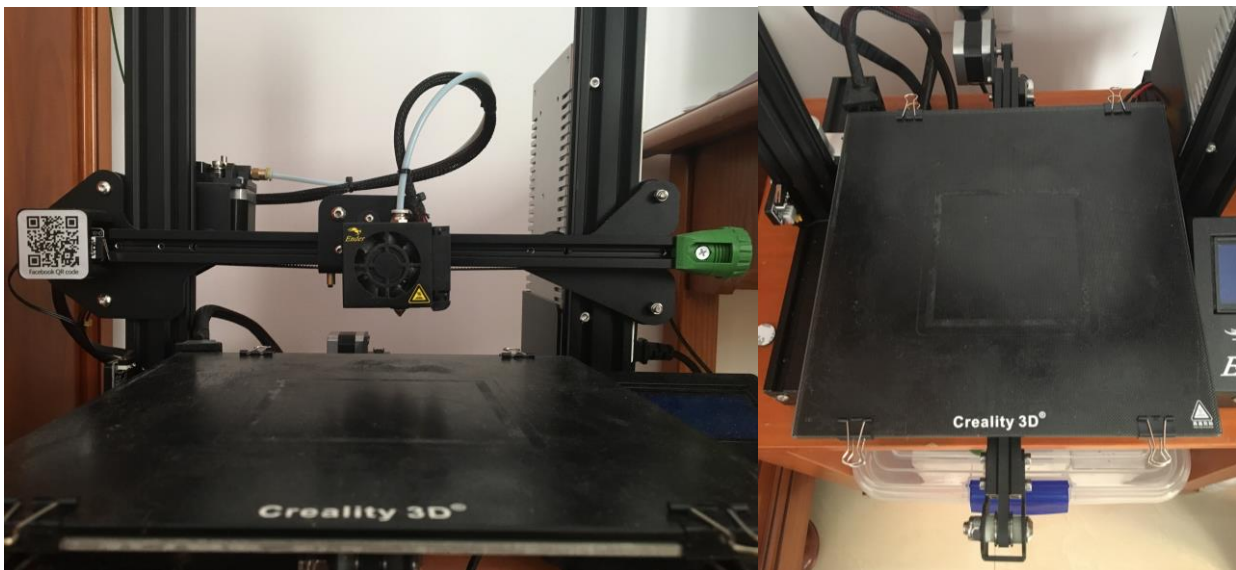


Figura 5.6 A la izquierda el eje X. A la derecha el eje Y.

El movimiento en la dirección Z lo realiza la boquilla junto al sistemas de accionamiento del eje X y el extrusor mediante un husillo.



Figura 5.7 Detalle del eje Z, movido mediante un husillo.

El material elegido para la realización del proyecto es PLA, ácido poliláctico. Se trata de un termoplástico biodegradable extraído del almidón del maíz, de la yuca o de la caña de azúcar. (25) Como las piezas fabricadas mediante FDM son ortotrópicas, las propiedades mecánicas de estas dependen de la dirección de aplicación de la carga.

Tabla 5.2 Propiedades del PLA

	Filamento (26)	Impresión 3D (27)	
		En plano XY (Paralela a las capas)	En dirección Z (Perpendicular a las capas)
Módulo de Young	3.3-3.6 GPa	1.23 GPa	1.12 GPa
Coefficiente de Poisson	0.38-0.40		
Límite elástico	55-72 MPa		
Resistencia a tracción	47-70 MPa	50 MPa	39 MPa
Resistencia a compresión	66-87 Mpa		
Temperatura de fusión	145-177°C		

6 DISEÑO DEL UTILLAJE

6.1 Diseño preliminar

La elección del mecanismo ha sido un proceso iterativo en el que se ha buscado el mecanismo más robusto y fiable, que permita realizar los cambios de posición de forma rápida y precisa y, además, es necesario que se pueda construir en la impresora 3D de la que se dispone en un tiempo razonable.

Por especificaciones de diseño, era necesario crear una carcasa para el cubo de calibración, que lo protegiera ante un posible impacto.

El cierre de la carcasa se realiza mediante unos pasadores que se colocan en los muñones, los cuales encajan en los orificios de la tapa.

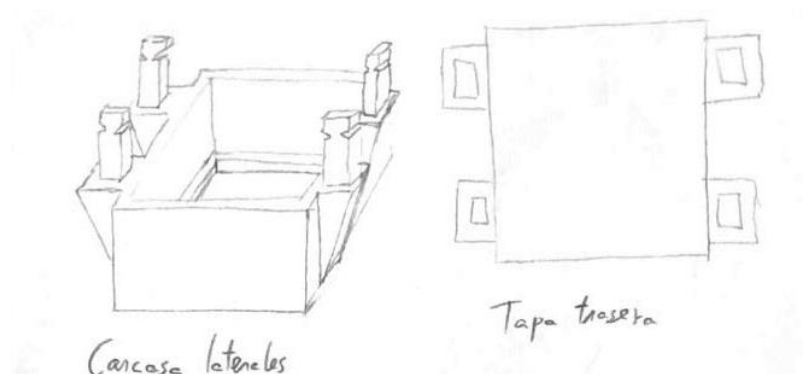


Figura 6.1 A la izquierda: perspectiva de la carcasa protectora. A la derecha: tapa trasera para cubrir completamente el patrón, excepto la cara expuesta.

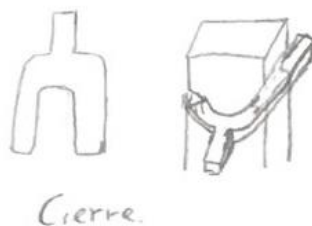


Figura 6.2 A la izquierda: pasador para asegurar la tapa de la carcasa. A la derecha: pasador colocado en el muñón de la carcasa.

Para determinar la posición longitudinal se pensó en un sistema de corredera con forma de cola de milano. La cola de milano estaría sobre las cuatro caras laterales del cubo, de forma que se pudiera rotar en las cuatro posiciones angulares.

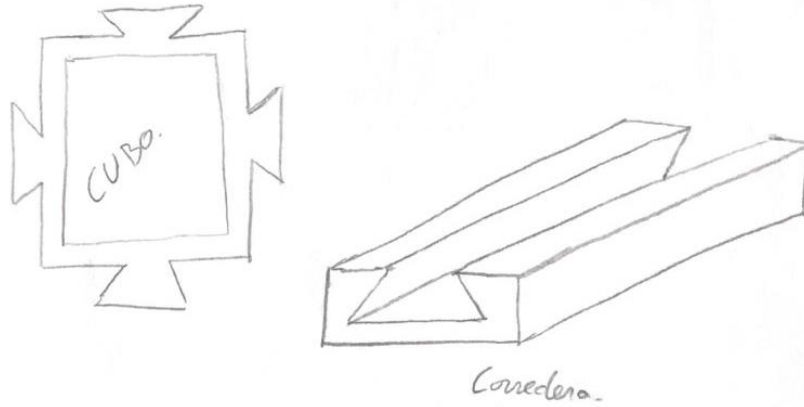


Figura 6.4 A la izquierda: vista frontal de la carcasa con las cuatro colas de milano. A la derecha: perspectiva de la corredera.



Figura 6.3 A la izquierda: vista frontal de la carcasa junto a la corredera. A la derecha: vista lateral.

Sin embargo, este sistema no permite inclinar el cubo. Se necesita incorporar un nuevo elemento que permita conmutar entre las posiciones vertical e inclinado. Para ello se pensó en usar dos mástiles, uno recto para la posición vertical y otro en ángulo para la posición inclinado. Para realizar las rotaciones del cubo sería necesario incorporar un eje a la parte posterior de la carcasa.

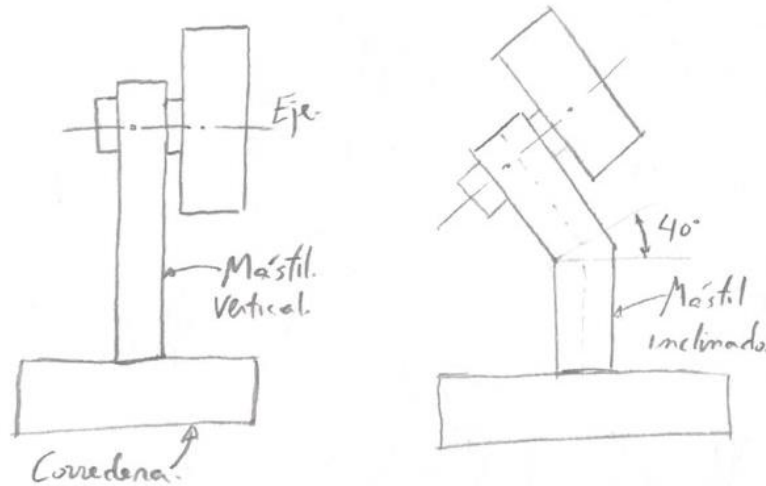


Figura 6.5 A la izquierda: patrón colocado en la posición vertical, usando el mástil recto. A la derecha: patrón colocado en la posición inclinado, usando el mástil en ángulo.

Combinando la geometría de ambos mástiles se puede crear uno que permita obtener las dos posiciones, por lo que ya no sería necesario cambiar de mástil para conmutar entre vertical o inclinado.

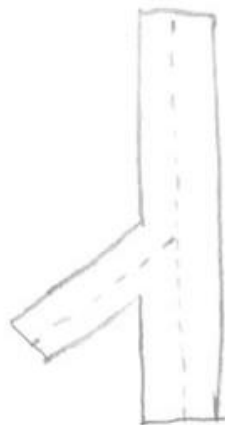


Figura 6.6 Mástil resultante de la combinación de la geometría de los dos mástiles anteriores.

En principio parece que este diseño puede servir, por lo que se continuará desarrollando la idea hasta lograr un prototipo funcional. En adelante se diferenciarán los elementos del utillaje como carcasa (C), mástil (M) y corredera (CR). La nomenclatura que se seguirá para identificar las diferentes piezas de cada elemento en su correspondiente versión es la siguiente:

$$Evn$$

Donde E es el identificador del elemento: carcasa (C), mástil (M) y corredera (CR); v es el número de la versión; y n es el número identificador de la pieza. Así, por ejemplo, la pieza C32 es la pieza 2 del elemento carcasa en su versión 3.

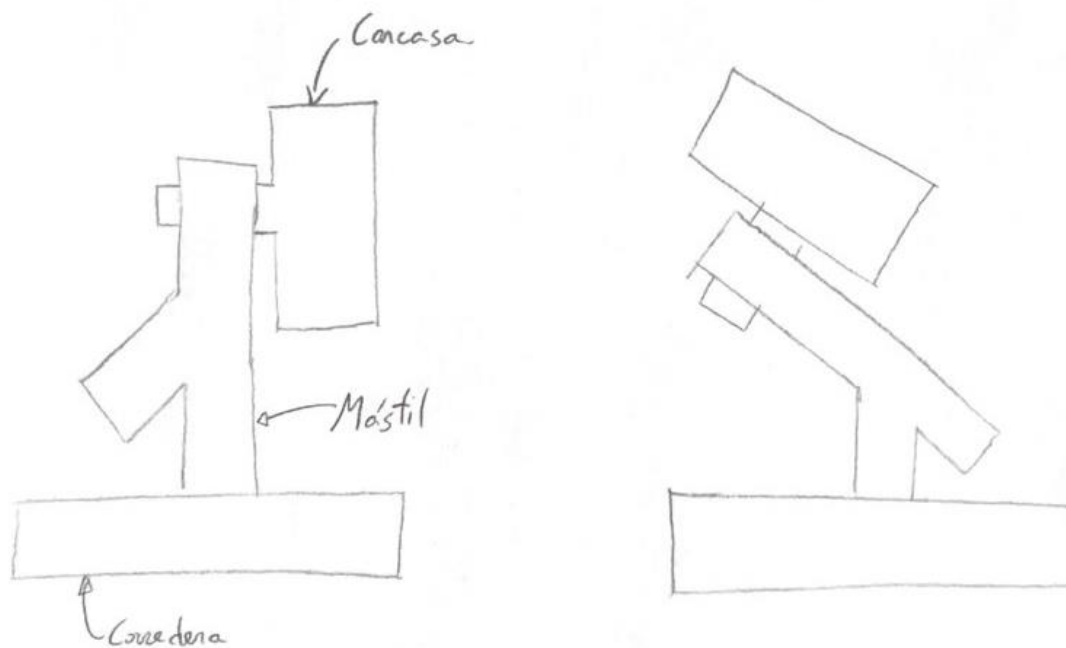


Figura 6.7 Vista lateral en la posición vertical (a la izquierda) y en la posición inclinado (a la derecha) del utillaje

Por último, se añadieron las siguientes condiciones iniciales para incluirlas en el diseño:

- Cond1: colocar el eje de giro entre la posición vertical y la posición inclinada en el centro de la cara expuesta del cubo de calibración. De esta forma no sería necesario modificar la altura del utillaje al cambiar de la posición vertical a la inclinada.
- Cond2: colocar el centro de gravedad del cubo de calibración, cuya masa es considerablemente superior a la del utillaje, en el plano central de la base del mástil para ambas posiciones. De esta forma el sistema estaría equilibrado y no se generarían esfuerzos flectores entre el mástil y la corredera.

6.2 Versión 1

Con este primer diseño se pretendía comprobar si el mecanismo elegido cumplía las distintas posiciones en las que hay que colocar el patrón de calibración. También fue un primer paso a la hora de determinar la mejor posición a la hora de imprimir las piezas.

Para dimensionar este primer diseño se optó por usar un modelo del cubo de calibración de pequeñas dimensiones para reducir el tiempo de impresión.

El hecho de haber escogido la tecnología FDM para fabricar este utillaje condiciona sensiblemente el diseño de las piezas, ya que hay que tener en cuenta la posición en la que se va a imprimir la pieza, así como el ángulo máximo en voladizo que se puede imprimir sin usar soportes, sin que pierda excesiva calidad o se desprenda el material.

Un aspecto importante a la hora de diseñar piezas que deben interactuar con otras es la tolerancia con la que se fabrican. Estas tolerancias dependen de la tecnología usada para su fabricación. Mientras que para el mecanizado las tolerancias pueden ser de apenas unas decenas de micras, para la impresión 3D se llega a las centenas de micras. Las tolerancias en la impresión 3D depende del material que se use, si experimenta grandes contracciones al enfriarse. En este aspecto, hay materiales como el ABS en el que puede ser necesario unas tolerancias de 0.5-0.6mm y otros como el PLA en el que se puede ajustar a 0.3-0.4mm. Este primer modelo se ha decidido diseñarlo con una tolerancia de 0.4mm. A partir del resultado que se obtenga se modificará la tolerancia para las siguientes versiones. (28)

6.2.1 Modelado

A continuación, se procede a realizar una explicación de los elementos del modelo, así como de los pasos seguidos para su diseño y modelado.

6.2.1.1 Carcasa

Es el elemento que sostiene y protege el cubo de calibración. Este elemento incluye además el eje de giro para la rotación del cubo. Está compuesto por cuatro piezas.

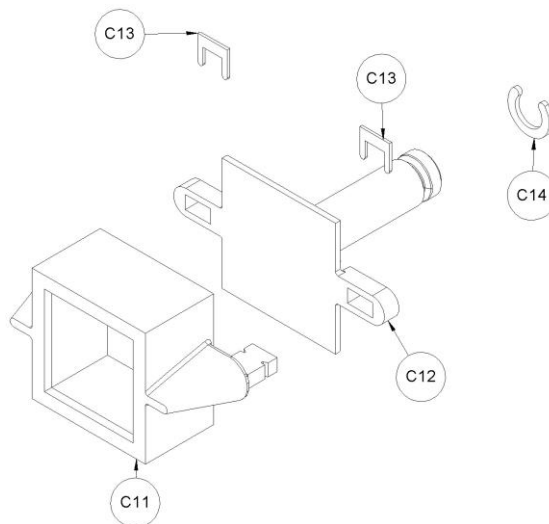


Figura 6.8 Despiece del elemento carcasa.

Pieza C11

Es la pieza que recubre el cubo de calibración. Esta pieza incorpora uno muñones que sirven para unirla a la pieza C12 y de esta forma acoger perfectamente el cubo de calibración.

El modelado de esta pieza comenzó por crear las paredes de la carcasa. Esto se realizó mediante la opción Operación Lámina en el comando Extrusión. En esta operación se debe especificar la altura de la extrusión y el espesor de las paredes. También se debe elegir la dirección en la que aumenta el espesor de la pared. En este caso hacia el exterior del croquis, de este modo no será necesario modificar el croquis en el caso de cambiar el espesor de la pared.

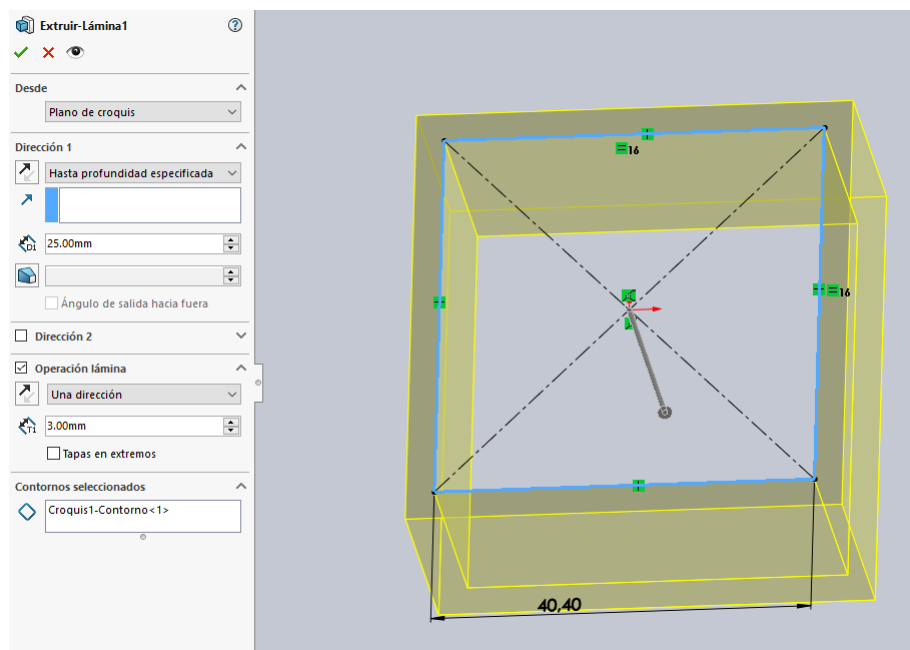


Figura 6.9 Pared de la carcasa.

Mediante otra extrusión-lámina se crea el marco para la superficie expuesta del cubo.

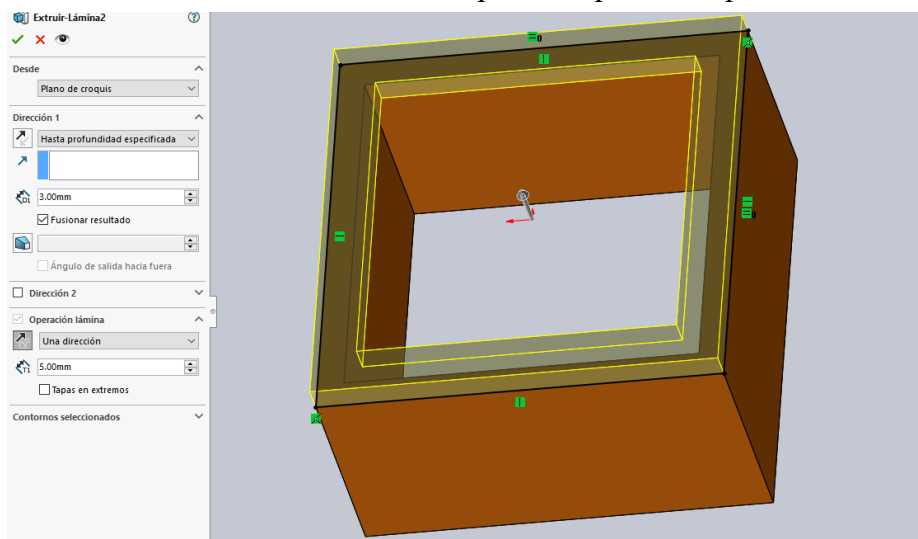


Figura 6.10 Marco para sostener el patrón.

Para crear la base de los muñones se usa la operación recubrir. Para ello necesitamos crear dos croquis. El croquis superior se ha creado a una distancia de 2 mm por debajo de la superficie superior para poder incluir radios de redondeo. Para ello ha sido necesario construir un plano paralelo a la superficie superior y a la distancia de 2mm.

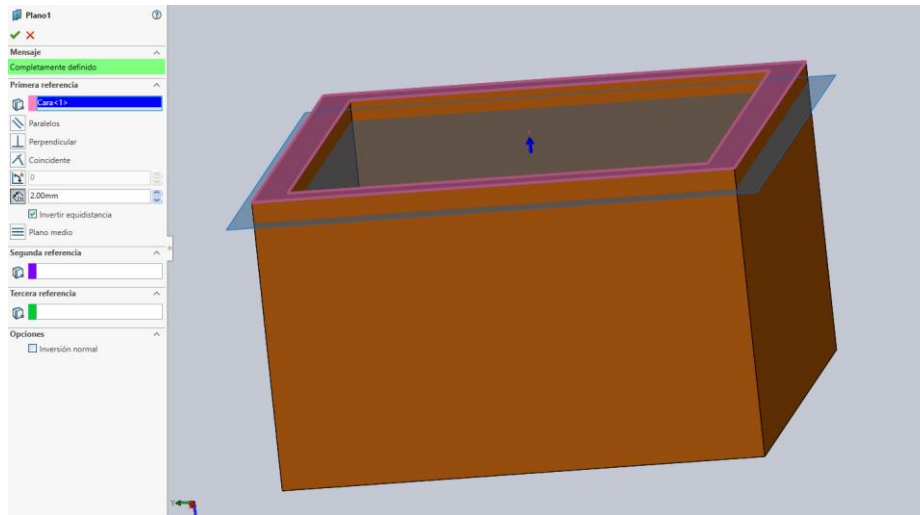


Figura 6.11 Operación para la construcción del plano auxiliar.

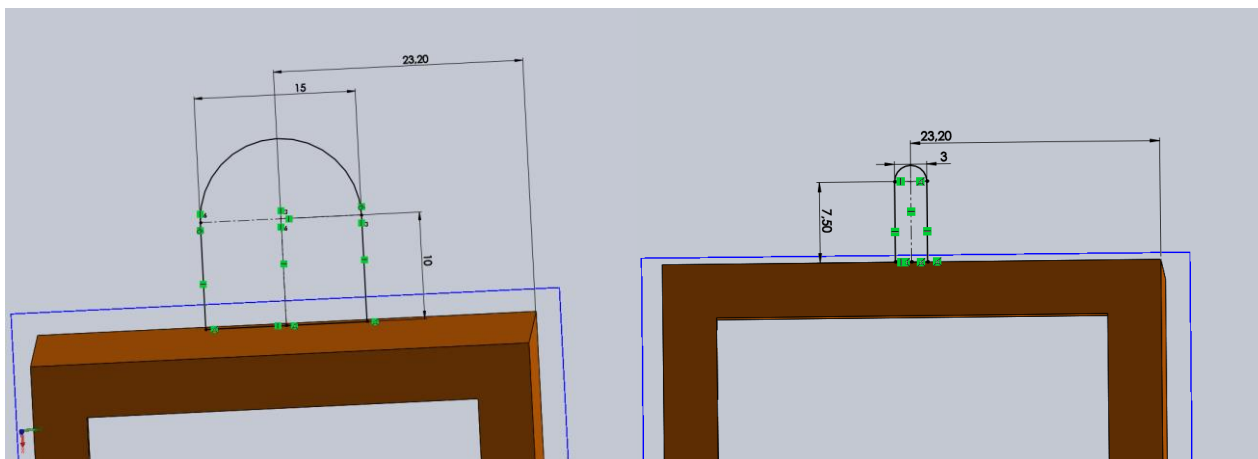


Figura 6.12 Croquis para la operación recubrir. A la izquierda el croquis superior, a la derecha el inferior. Las dimensiones del croquis inferior se han obtenido para que el ángulo sea menor de 25° , siendo la altura de 26mm.

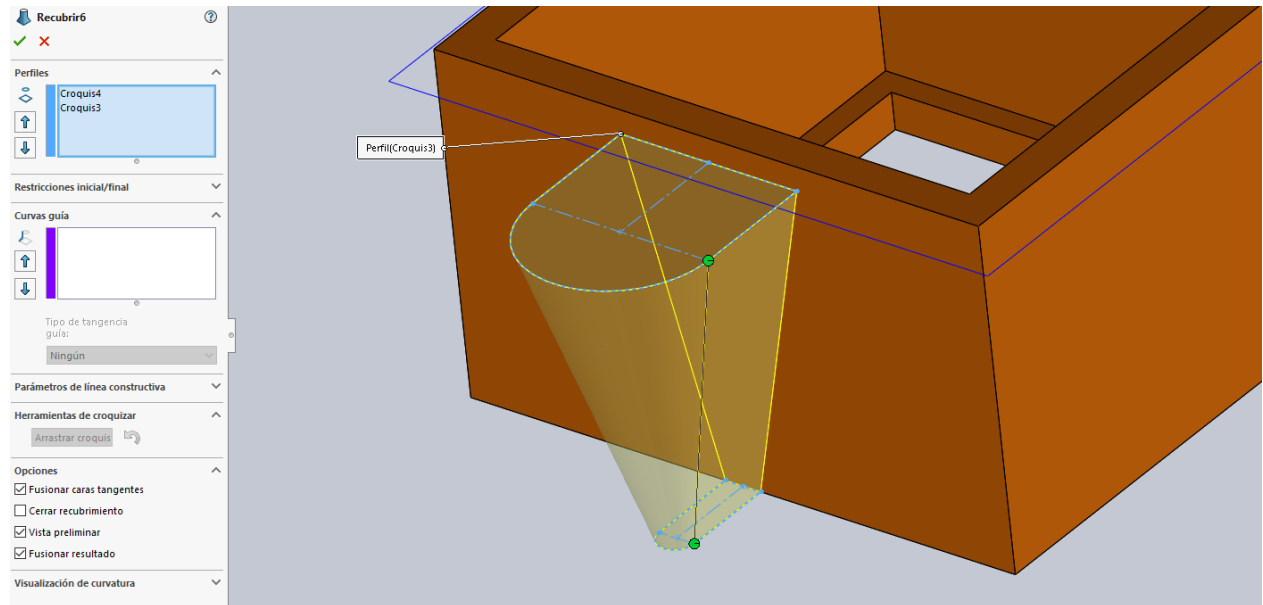


Figura 6.13 Operación recubrir para crear la base de los muñones.

El muñón se crea mediante extrusión y las ranuras de este mediante corte barrido. Para ello se necesita el croquis con el que se pretende cortar y la dirección del corte.

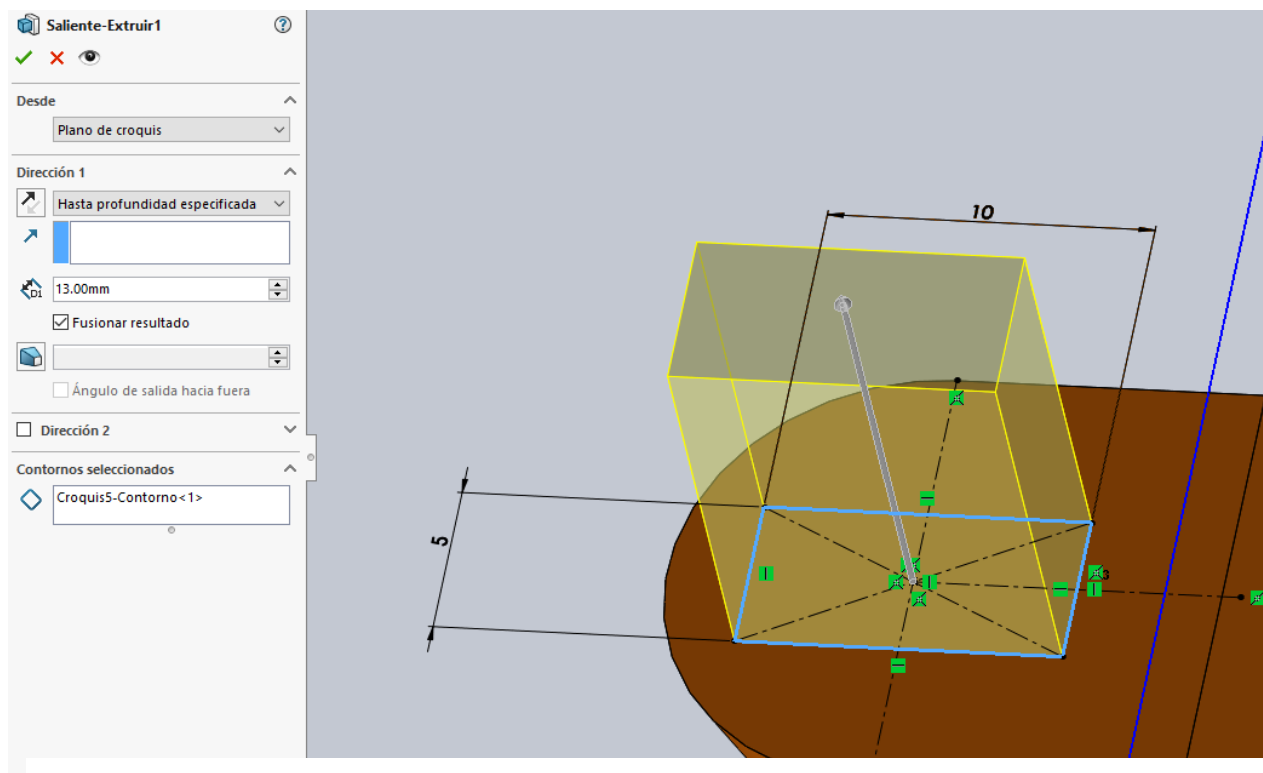


Figura 6.14 Extrusión del croquis con sus dimensiones.

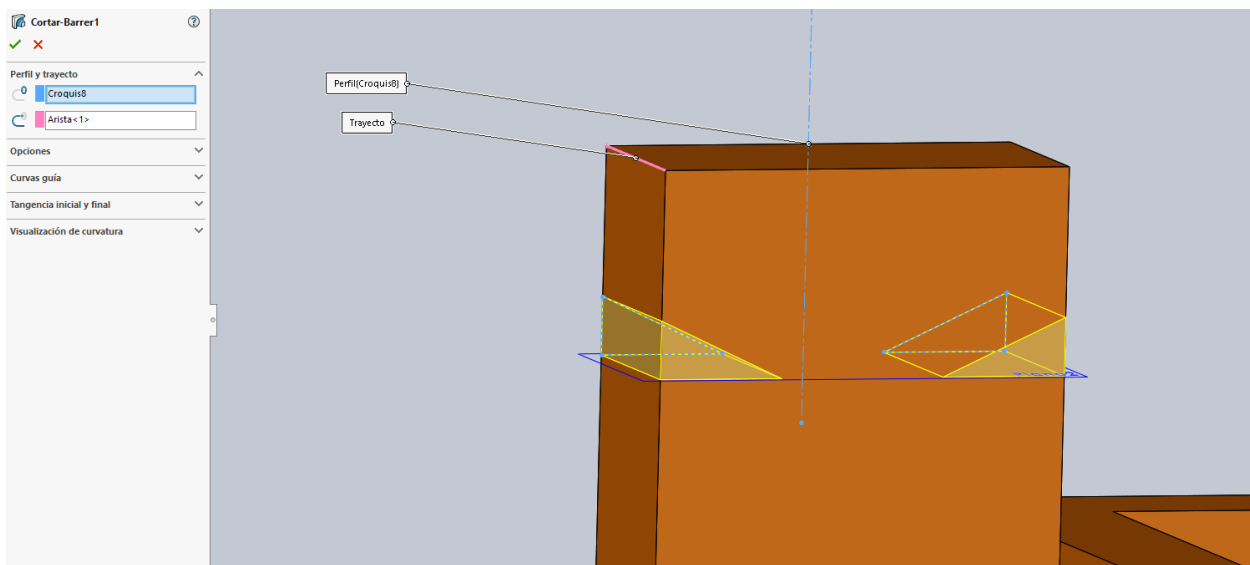


Figura 6.15 Operación corte barrido para crear las ranuras donde se alojan los pasadores para fijar la tapa de la carcasa.

Una vez realizado uno de los muñones, el otro se crea por simetría. En este momento se pone en evidencia la importancia de escoger bien los planos al comenzar a modelar.

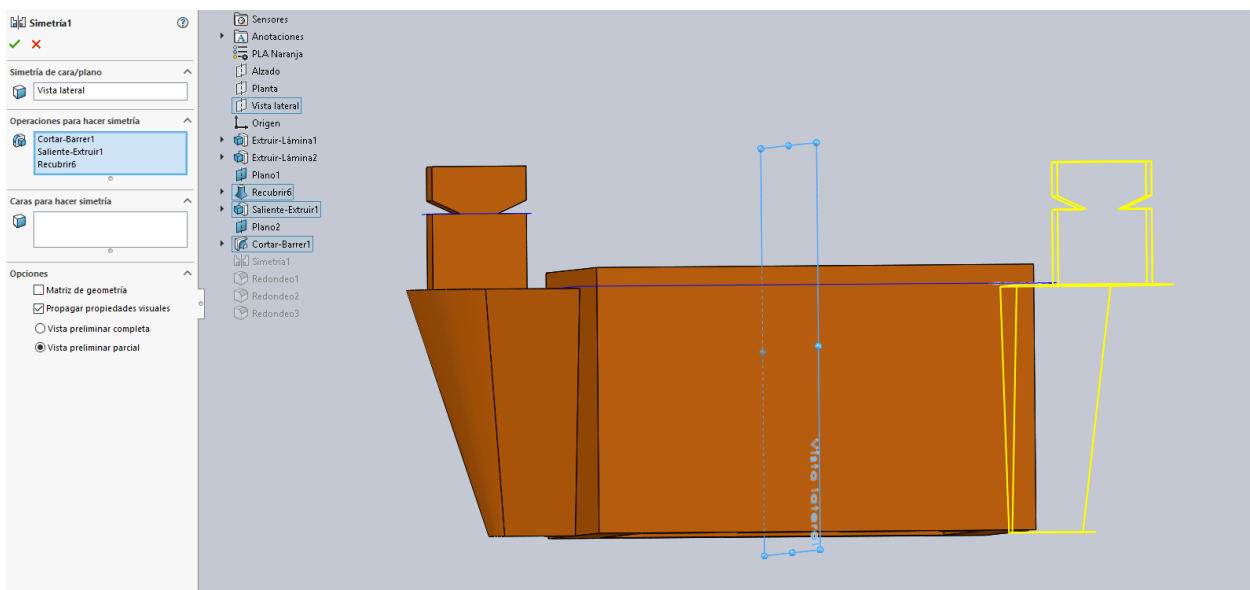


Figura 6.16 Operación de simetría para crear el otro muñón.

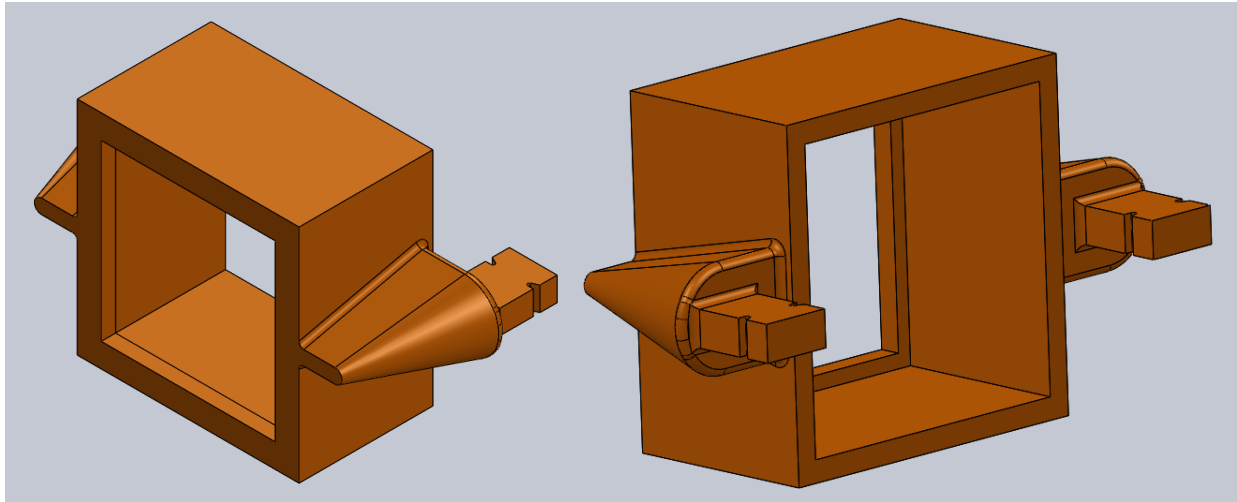


Figura 6.17 Perspectivas de la pieza C11 terminada.

Pieza C12

Es la pieza que cubre la cara posterior del cubo de calibración y sirve como tapa de la pieza C11. Esta pieza incluye el eje de giro y el sistema de posicionamiento para las rotaciones, compartido con la Pieza M11. Este sistema está formado por cuatro resaltes que encajan en cuatro ranuras de la pieza M01, que sirven para posicionar rotacionalmente el cubo, y ocho imanes de neodimio, cuatro en esta pieza y otros cuatro en la pieza M11, para asegurar la posición. El eje incluye una muela donde se coloca una arandela de fijación para evitar que el eje se salga del agujero.

La base de esta pieza será la cara posterior del cubo. Para ello se realizó la extrusión de un croquis con las dimensiones exteriores de la carcasa.

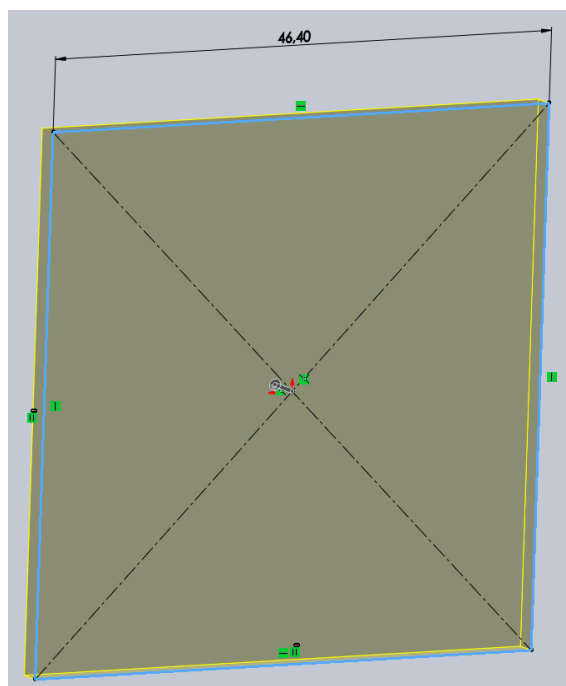


Figura 6.18 Extrusión de la base a una altura de 2mm.

Seguidamente se modeló la parte relativa a esta pieza del sistema de posicionamiento rotacional. Se comenzó creando el cilindro que sirve como base para este sistema y sobre el que se tallarán los resaltes y los taladros para los imanes. Para poder determinar las dimensiones de estos elementos se realizó primero el modelado del eje.

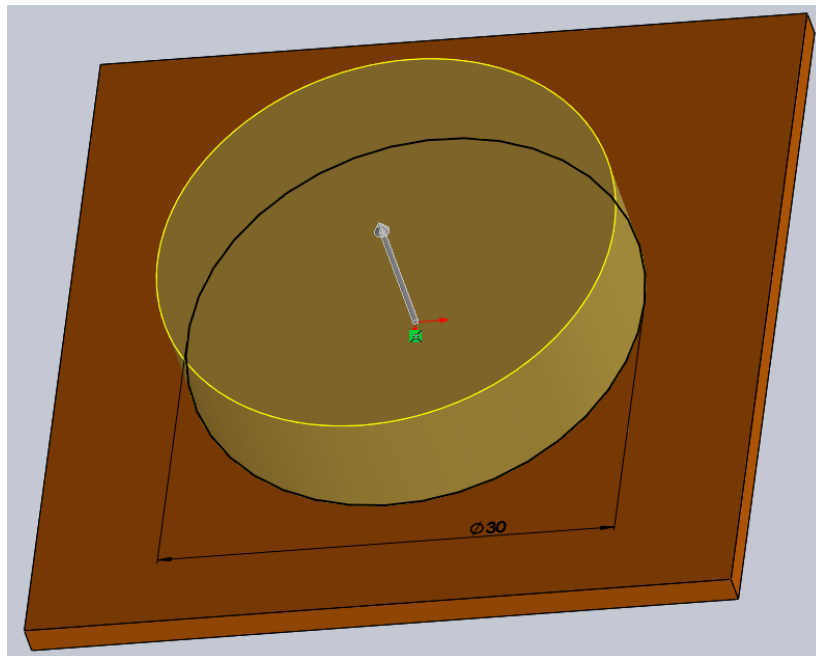


Figura 6.19 Extrusión de cilindro base a una altura de 8mm.

Se decidió modelar el eje con un diámetro de 15mm y una longitud de 50mm. Esto se trata de una decisión empírica y, como tal, habrá que comprobar su validez cuando se realice la primera versión operativa. La ranura donde irá encajada la arandela de fijación se realizó mediante un corte por barrido, aunque también podría crearse mediante un corte por revolución.

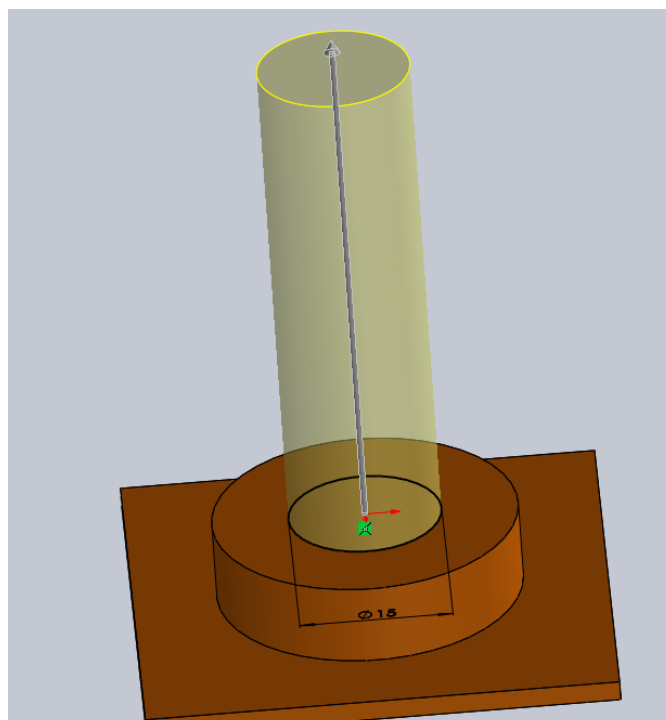


Figura 6.20 Extrusión del eje.

Una vez modelado el eje se crearon los resaltes y los taladros del sistema de posicionamiento rotacional. Para realizar los resaltes se construyó un plano tangente al eje sobre el que se creó el croquis, para después realizarle una extrusión. El taladro se creó con la operación extruir corte. Para realizar los restantes resaltes y taladros se usó la operación matriz circular. En esta operación se especifica el número de instancias, cuatro en este caso, y la separación entre ellas, 90° . También hay que señalar la dirección que servirá como eje para crear la operación, que en este caso se puede escoger la cara del eje modelado anteriormente.

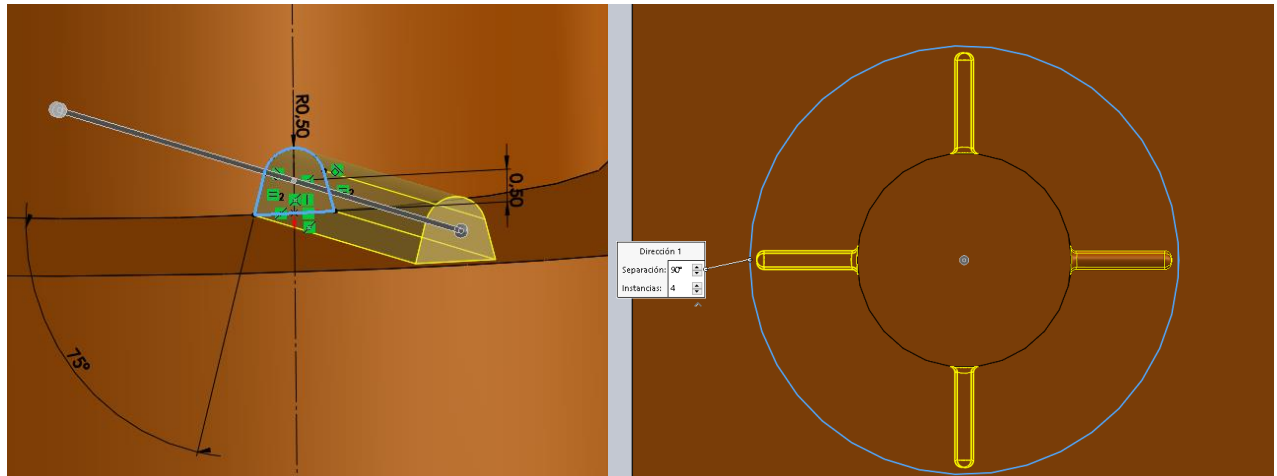


Figura 6.21 Construcción de los resaltes. A la izquierda: extrusión de uno de ellos desde su croquis. A la derecha: operación matriz circular para construir los restantes.

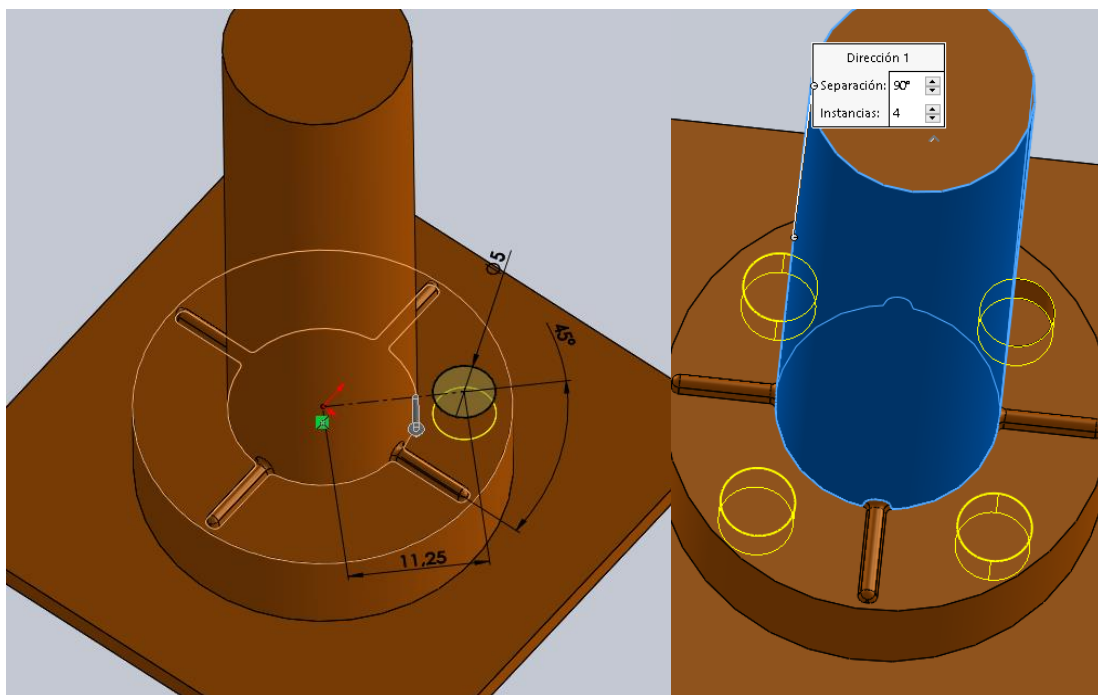


Figura 6.22 Construcción de los orificios. A la izquierda: corte de uno de ellos desde su croquis. A la derecha: operación matriz circular para construir los restantes.

Por último, solo queda modelar los orificios donde encajan los muñones de la pieza C11, que se realizan mediante la extrusión del croquis y simetría.

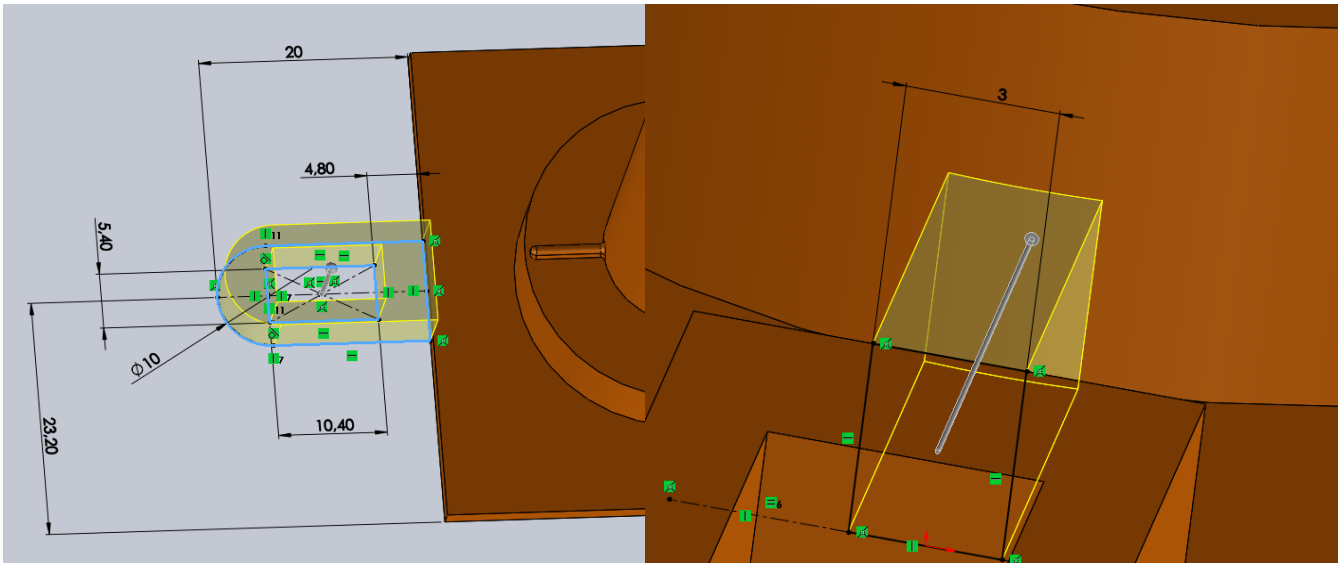


Figura 6.23 A la izquierda: extrusión de uno de los orificios desde su croquis hasta una cota de 6mm. A la derecha: construcción de un nervio de refuerzo desde el orificio hasta el cilindro base.

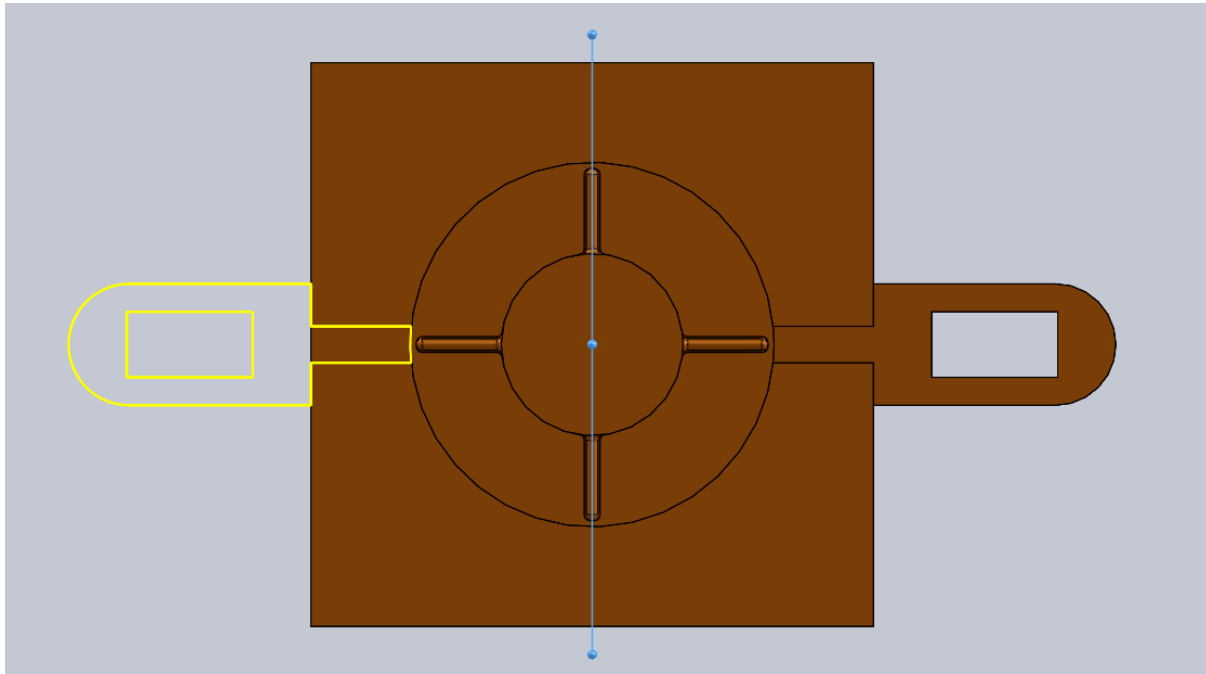


Figura 6.24 Simetría para obtener los dos orificios.

Se muestra las perspectivas de la pieza terminada, a la que además se le ha añadido una ranura al eje para colocar el circlip que lo mantiene en su posición.

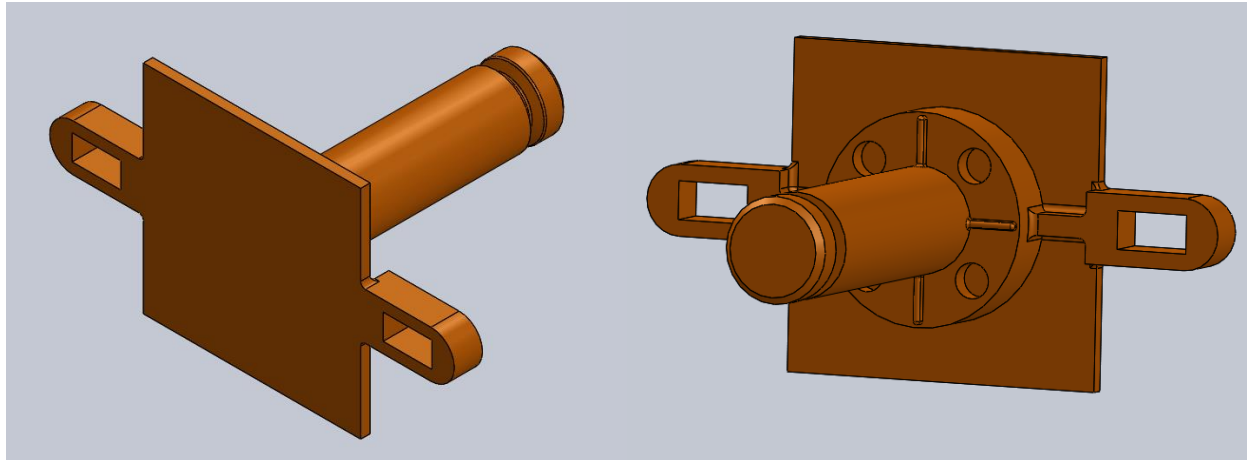


Figura 6.25 Perspectivas de la pieza terminada.

Pieza C13

Es un pasador que se coloca en los muñones de la pieza C11 para fijarla a la pieza C12.

Esta pieza se realiza mediante la extrusión del croquis. Cabe resalta la falta de juego en esta pieza, debido a que se debe realizar un ajuste fijo.

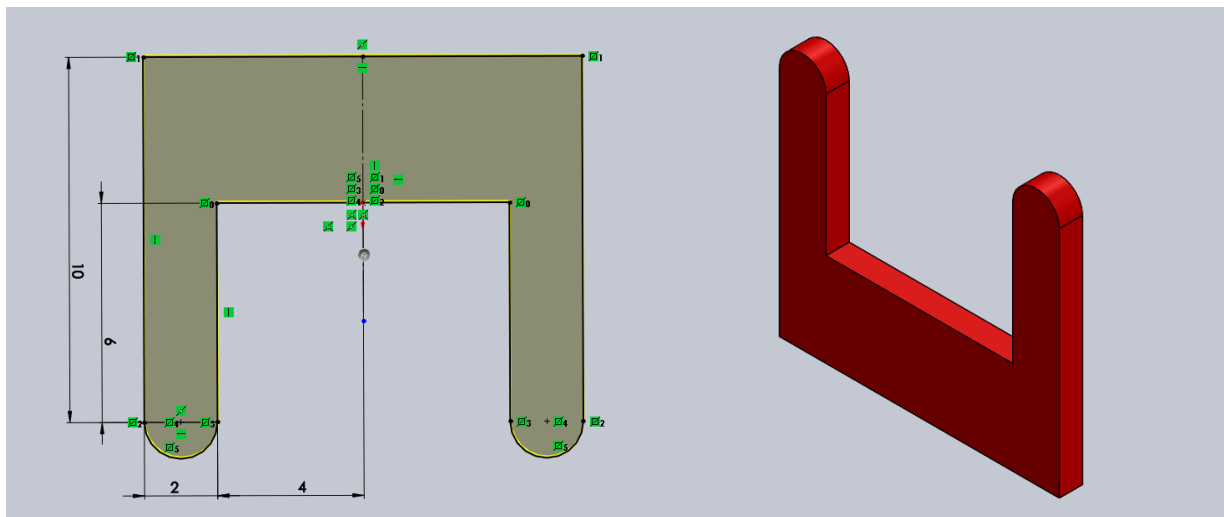


Figura 6.26 A la izquierda: extrusión desde su croquis a una cota de 1mm. A la derecha: perspectiva de la pieza terminada.

Pieza C14

Pieza en forma de circlip para fijar la posición del eje.

Esta pieza se realiza mediante la extrusión del croquis. Al igual que la anterior, no se modeló con tolerancia, debido a que se debe realizar un ajuste fijo.

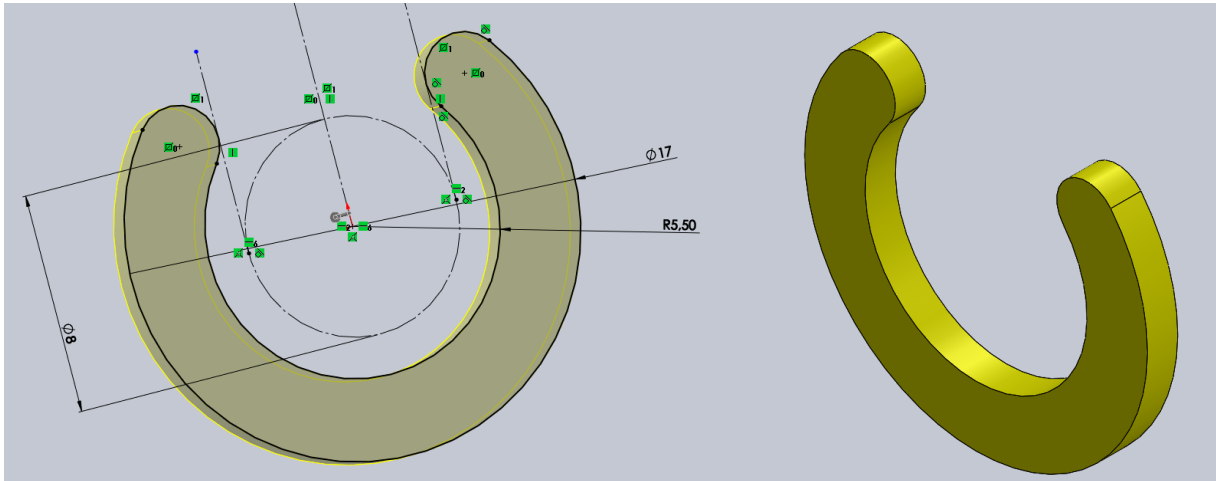


Figura 6.27 A la izquierda: extrusión desde su croquis a una cota de 1.5mm. A la derecha: perspectiva de la pieza terminada.

Para colocar esta pieza es necesario realizar una ranura en el eje de la pieza C12. Como la ranura es poco profunda, se ha probado con un ángulo en voladizo de 30°. Una vez impreso, se podrá comprobar si no hay desprendimiento.

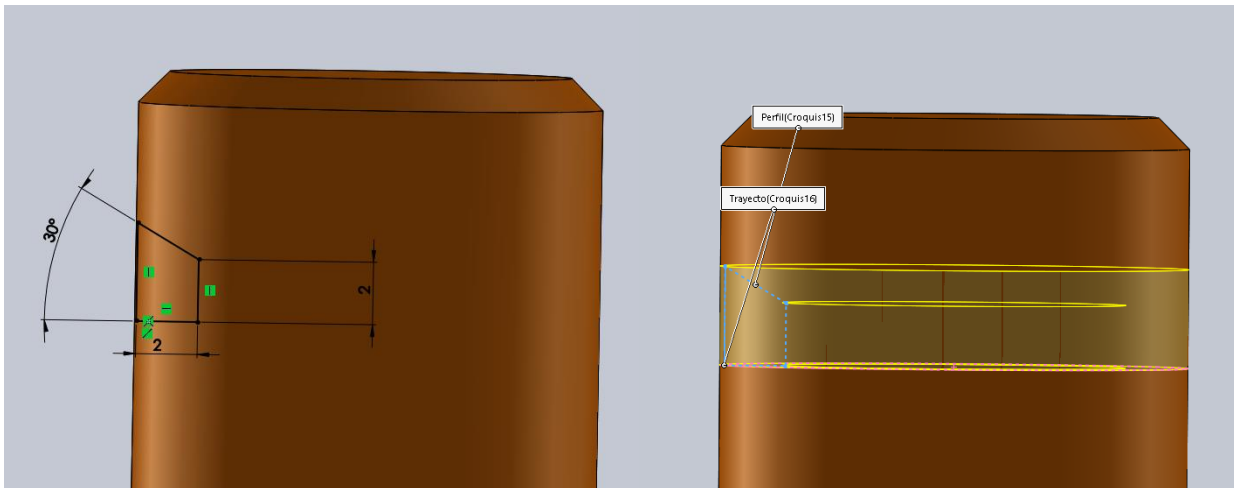


Figura 6.28 A la izquierda: croquis para realizar la ranura mediante corte por barrido. A la derecha: operación de corte por barrido.

6.2.1.2 Mástil

Es el elemento que coloca el cubo en posición vertical y en la posición inclinada. El modelado de este elemento requirió un diseño gráfico previo. Para ello se usó el programa AutoCAD. Este diseño se realizó teniendo en cuenta las condiciones iniciales.

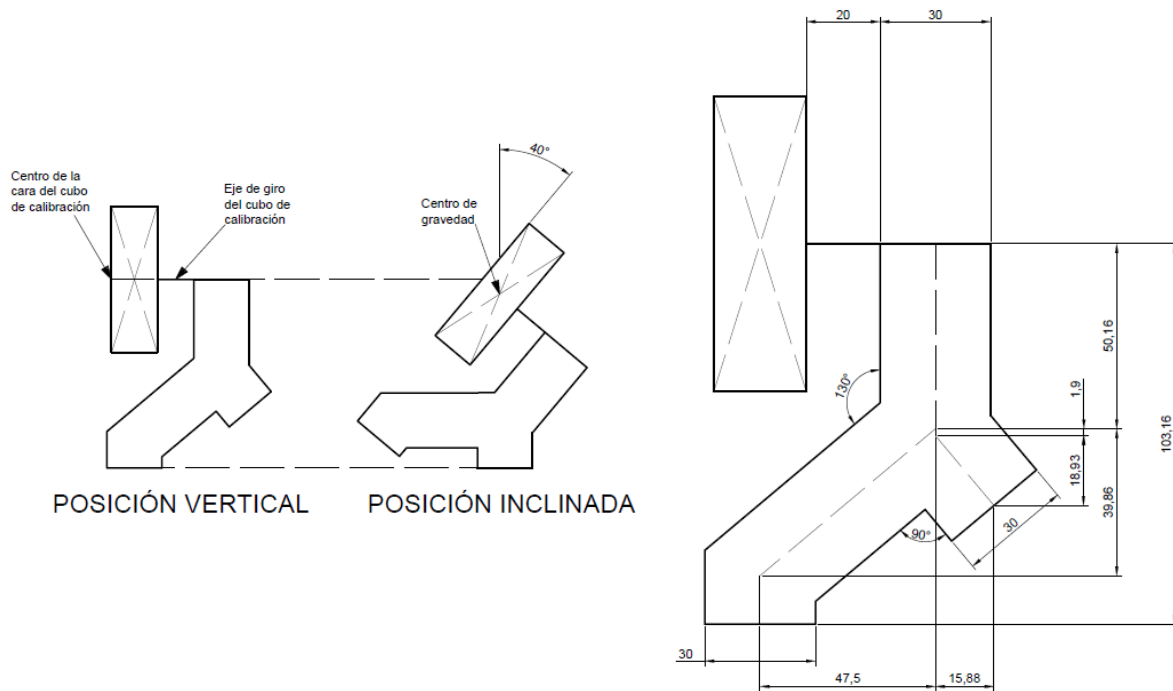


Figura 6.29 A la izquierda: diseño gráfico del mástil. A la derecha: dimensiones del mástil.

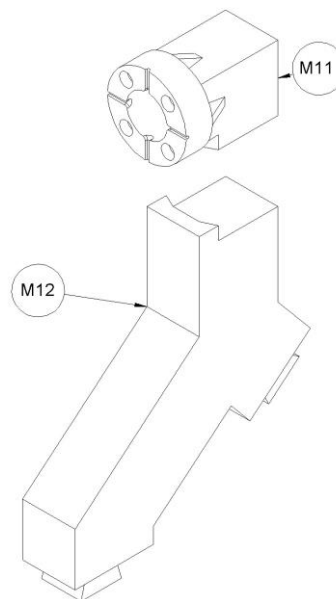


Figura 6.30 Despiece del elemento mástil.

Pieza M11

Es la pieza superior del mástil. Incluye el agujero del eje y la otra mitad del sistema de posicionamiento para las rotaciones.

El modelado de esta pieza comenzó con la extrusión del saliente donde encajará la otra parte del mástil, la pieza M12.

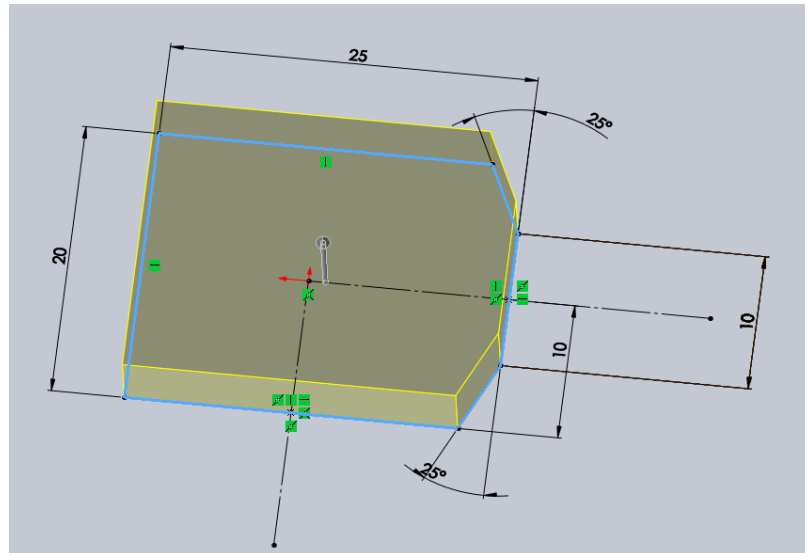


Figura 6.31 Extrusión desde su croquis hasta una altura de 5mm.

Seguidamente se realizó la extrusión de la sección del mástil hasta una altura de 20mm, quedando en la parte frontal una superficie cuadrada de lado 20mm, en cuyo centro geométrico irá el centro del agujero por el que pasa el eje de la pieza C12, cuyo diámetro es de 15.4mm y se realizó con la operación extruir corte.

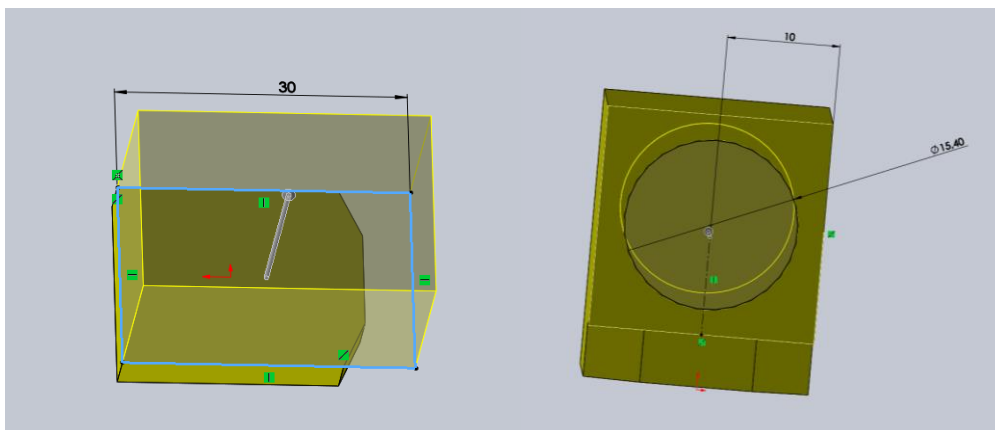


Figura 6.32 A la izquierda: extrusión de la sección del mástil. A derecha: taladro para el eje, realizado por corte seleccionando la opción hasta siguiente.

Falta por realizar la otra mitad del sistema de posicionado rotacional. Para ello se comenzó por la extrusión de un cilindro, con el taladro incluido, sobre la cara frontal.

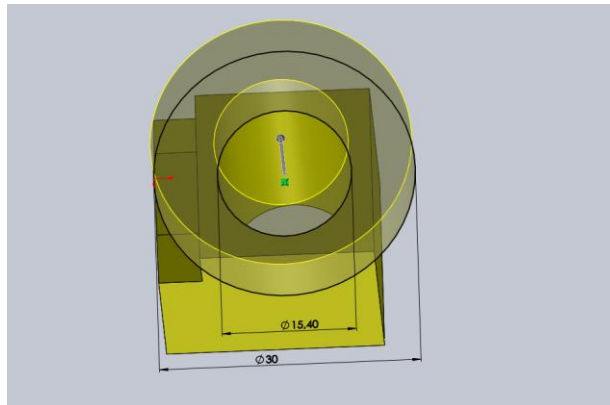


Figura 6.33 Extrusión del cilindro hasta una altura de 10mm.

De igual modo que en la pieza C12, se tallaron los taladros para los imanes y, es esta ocasión, las ranuras donde encajan los resaltes.

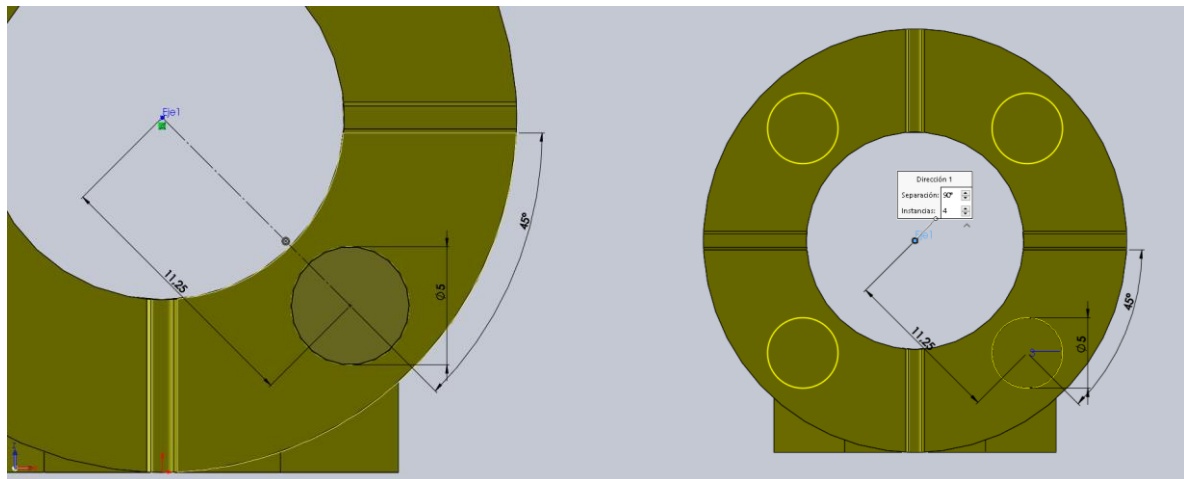


Figura 6.34 A la izquierda: taladro para alojar los imanes con una profundidad de 3mm. A la derecha: construcción de los restantes mediante matriz circular.

Para el modelado de estas ranuras se utilizó la operación corte por barrido, para lo que fue necesario la construcción de un plano tangente al cilindro base donde realiza el croquis de la sección para la operación.

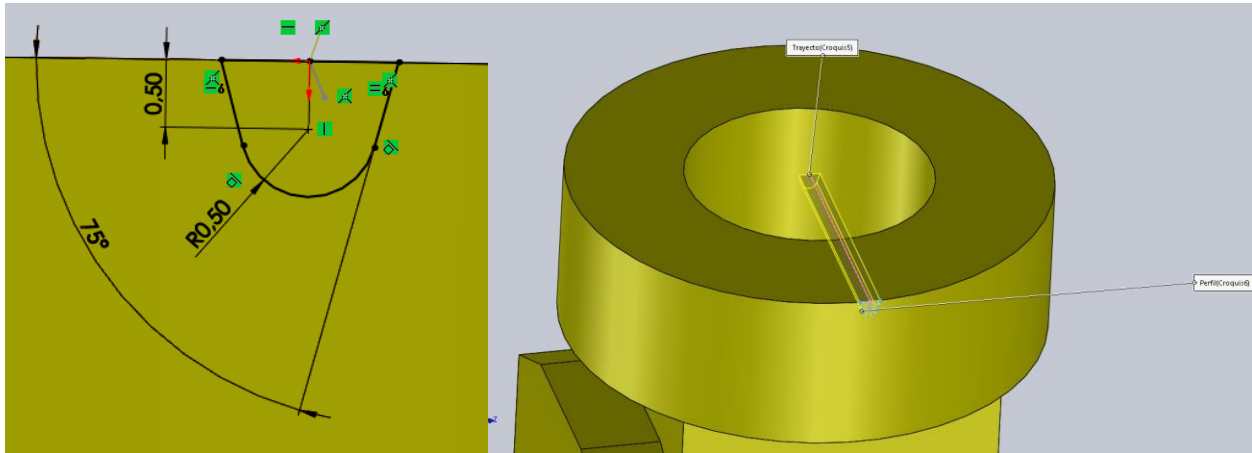


Figura 6.35 A la izquierda: croquis de sección de la ranura. A la derecha: operación corte por barrido.

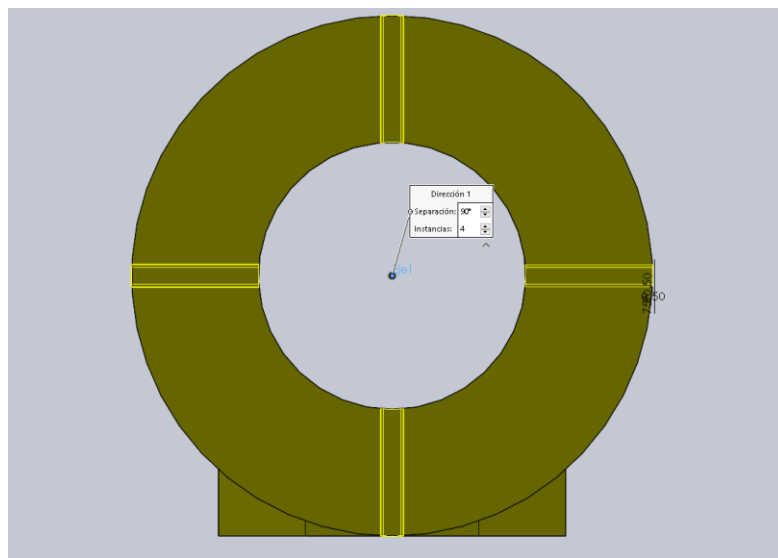


Figura 6.36 Operación matriz circular para realizar las ranuras restantes.

Para terminar con el modelado de la pieza, se incluyeron unos nervios que actúan como soportes para los voladizos del cilindro. Estos nervios están contruidos con un ángulo de 25° , de modo que sean fácilmente imprimibles sin necesidad de incluir soportes. Nuevamente, se utilizó la operación matriz circular para crear los tres (no cuatro) nervios restantes. A uno de los voladizos no se le pudo crear el nervio ya que esa parte de la pieza debía encajar con la pieza M12.

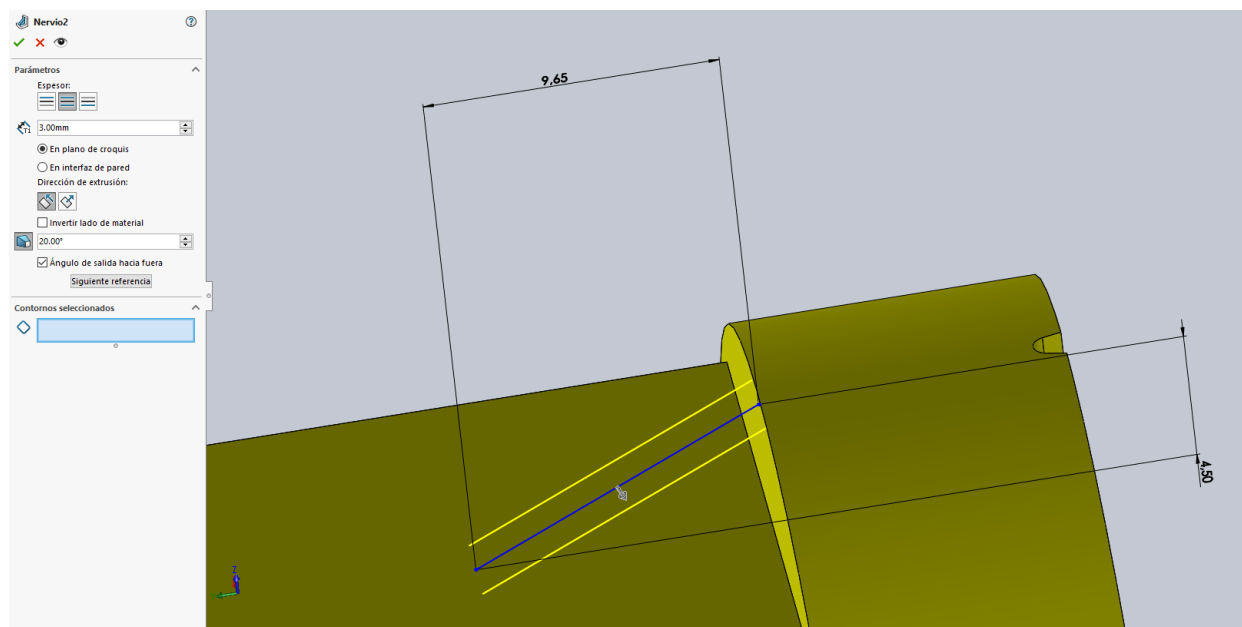


Figura 6.37 Nervio creado con la operación nervio. En la imagen puede verse en azul el croquis para la operación y en amarillo el espesor del nervio, determinado en 3mm.

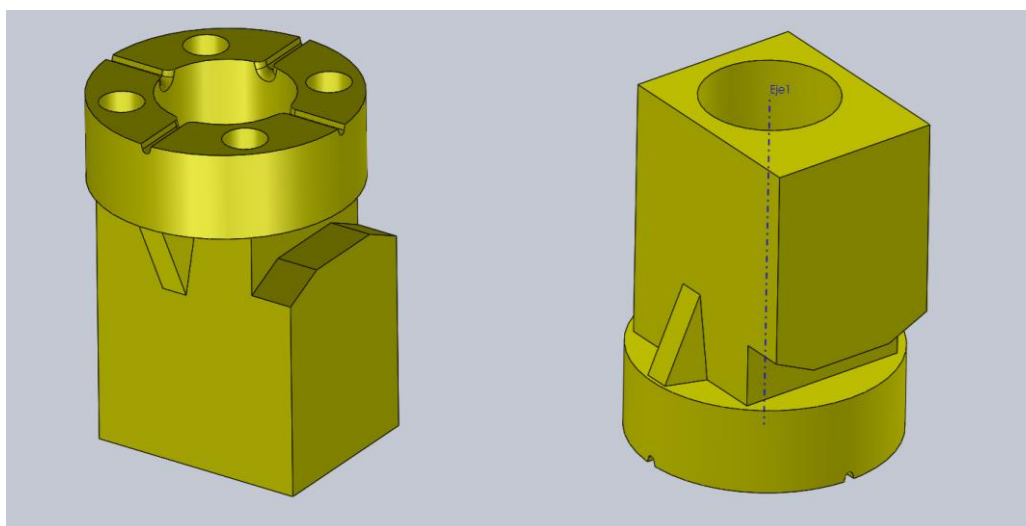


Figura 6.38 Perspectivas de la pieza terminada.

Pieza M12

Es la pieza encargada de conmutar la posición del cubo entre vertical e inclinado. Esto se realiza mediante una unión tipo cola de milano entre esta pieza y la pieza CR11 de la corredera.

Las dimensiones para realizar el croquis principal de esta pieza se obtienen de la **Figura 6.29**, teniendo en cuenta que a la cota de 155 mm hay que restarle 10 mm que le corresponden a la pieza M11. Realizando una extrusión a este croquis se obtiene la base para modelar esta pieza.

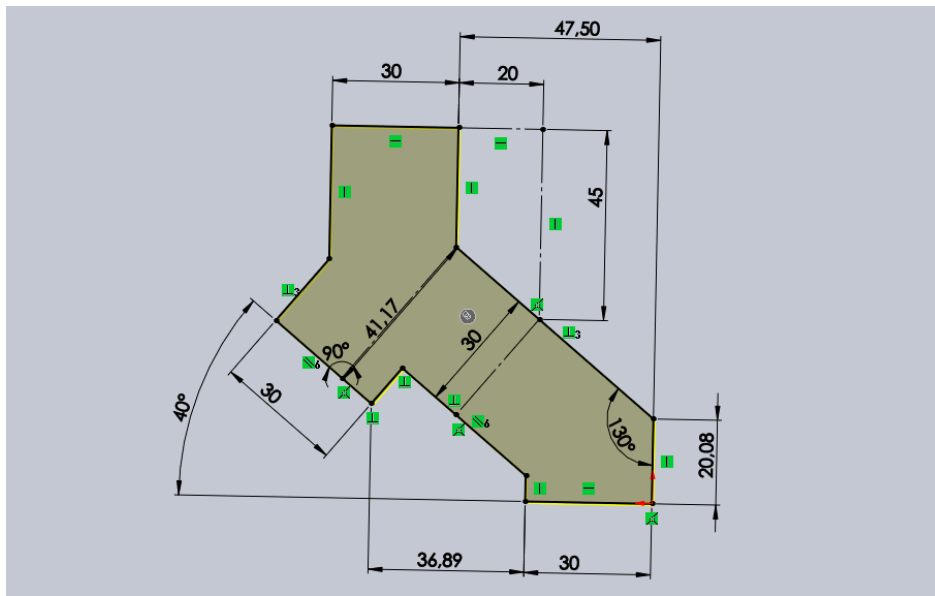


Figura 6.39 Extrusión desde su croquis con una altura de 20mm.

El siguiente paso es añadirle una cola de milano en cada una de las dos superficies que se pondrán en contacto con la pieza CR11. Para realizar estos croquis es necesario tener presente que la extrusión de las colas de milano en esta pieza se traduce en un corte en la pieza CR11, y por la forma en que será imprimida, en un voladizo. Por lo tanto, los ángulos de estas se fijan en 25° para poder realizar la impresión sin soportes. A la hora de realizar la extrusión, es necesario dejar un margen para alojar el tope de la unión entre esta pieza y la pieza CR11.

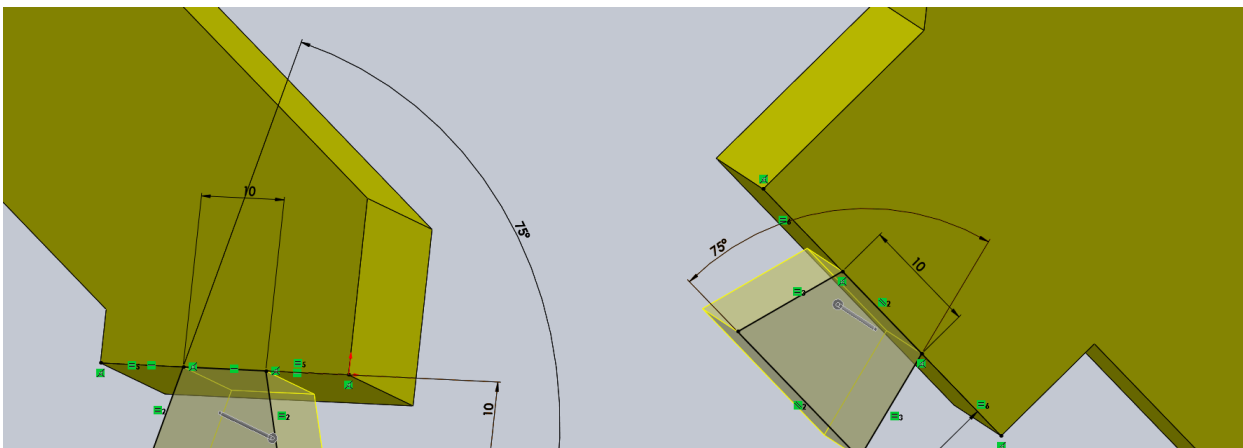


Figura 6.40 A la izquierda: cola de milano en de la posición vertical. A la derecha: cola de milano de la posición inclinado. Ambas se han realizado por una extrusión de 15mm.

Por último, hay que añadirle el resalte sobre la que se colocará la pieza M11.

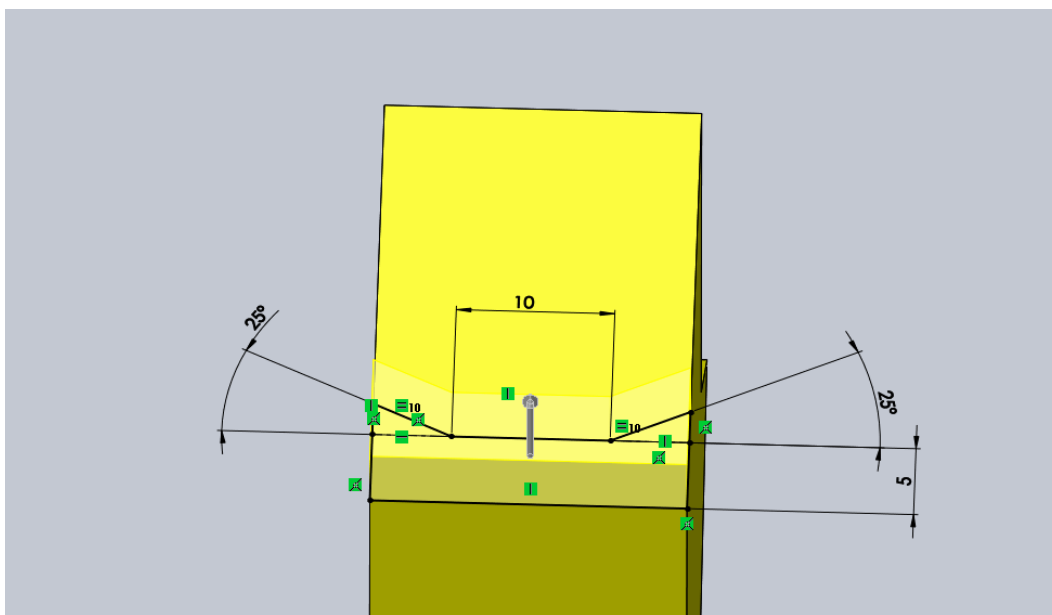


Figura 6.41 Estrusión del resalte a una altura de 5mm.

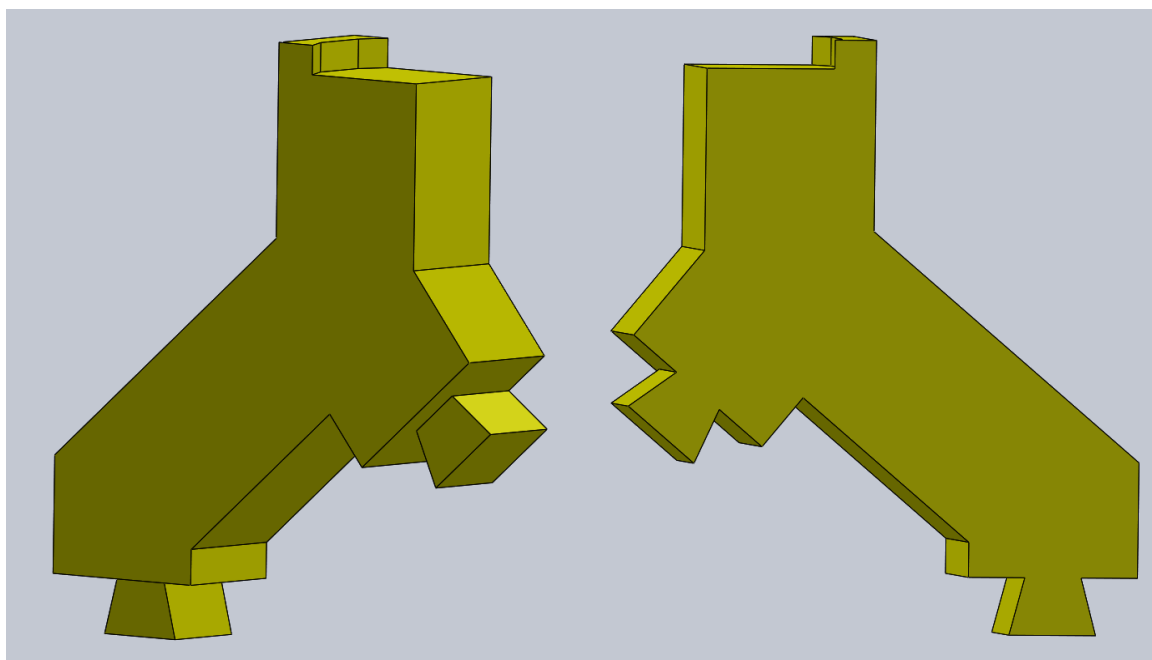


Figura 6.42 Perspectivas de la pieza terminada.

6.2.1.3 Corredera

Este elemento es el encargado de posicionar el cubo longitudinalmente. Consta de un par cinemático de translación en forma de cola de milano. Está compuesto por dos piezas.

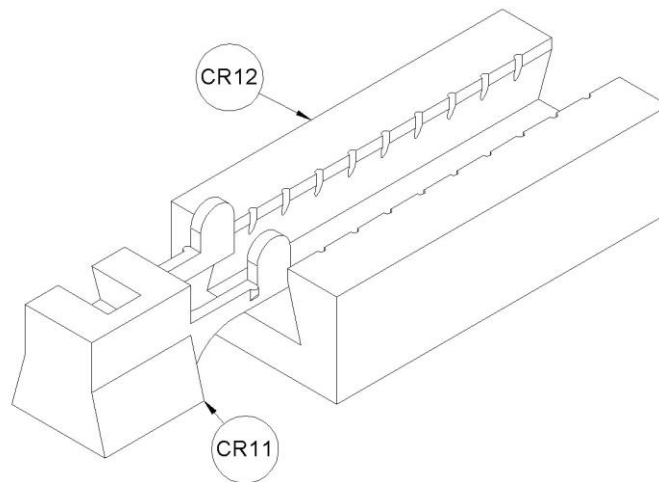


Figura 6.43 Despiece del elemento corredera.

Pieza CR11

Esta pieza es la corredera. Tiene un sistema de posicionamiento longitudinal del cubo que encaja en unas posiciones establecidas en la guía y el hueco donde encaja la pieza M12.

El modelado de esta pieza comienza con la extrusión de la sección de la corredera. Al igual que en el caso anterior, el ángulo de la cola de milano en este caso también es de 25° para poder imprimir el voladizo correspondiente en la pieza CR12.

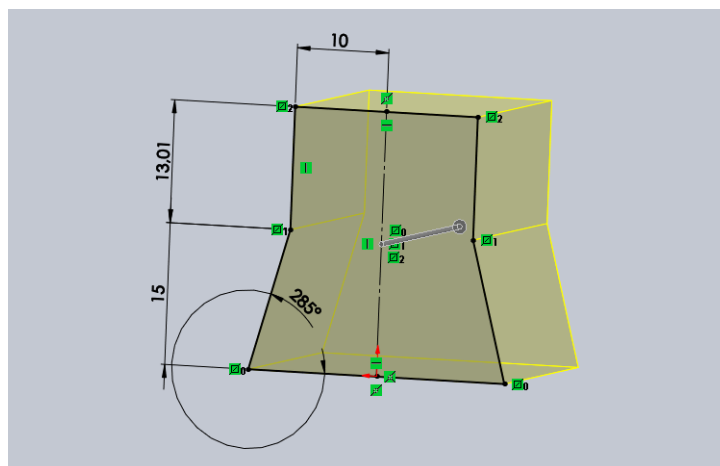


Figura 6.44 Extrusión de la sección de la corredera desde croquis hasta una altura de 30mm.

Para continuar con el modelado se le añadió el hueco donde encaja la pieza M12 mediante la operación extruir corte. Al tratarse esta vez de un ajuste fijo, donde se necesita que haya cierta presión, no se incluye en el croquis la juego de 0.4mm.

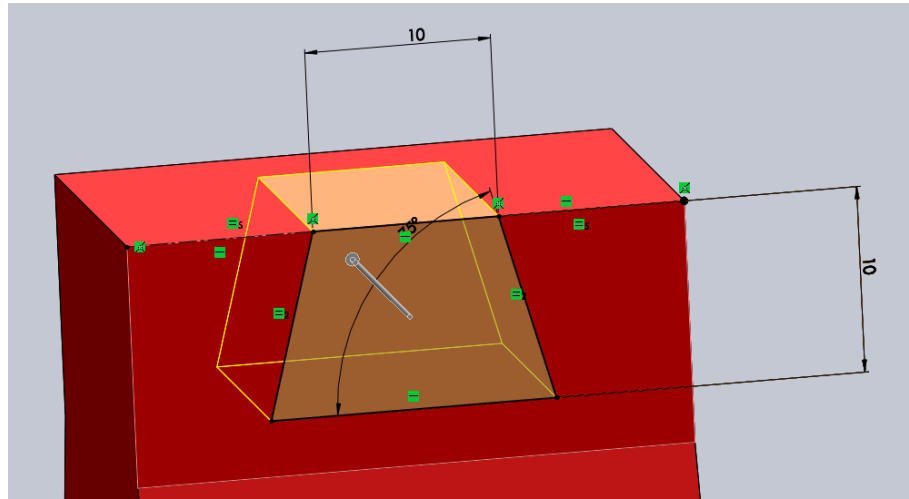


Figura 6.45 Construcción del hueco para la cola de milano con una profundidad de 15mm.

Por último, se modeló el sistema de posicionamiento longitudinal. Para ello se creó el croquis sobre el plano de la superficie lateral de la pieza y se usó la operación extruir. La profundidad de esta extrusión fue de 3mm. Al igual que en ocasiones anteriores, este valor es meramente intuitivo y hay que determinar empíricamente si el mecanismo posee la suficiente flexibilidad para ser retraído.

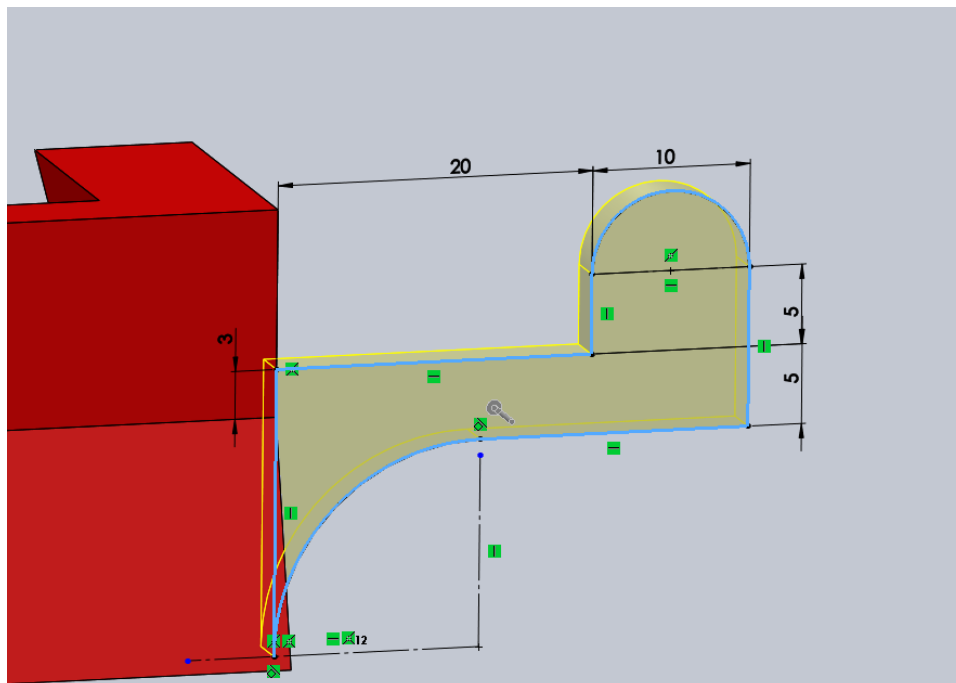


Figura 6.46 Extrusión desde el croquis de una de las palancas del sistema de posicionamiento longitudinal, el restando se obtiene por simetría.

El siguiente paso es añadirle los resaltes que encajaran en las ranuras de la pieza CR12 para fijar la posición. A estos resaltes se le ha realizado un chaflán en la parte inferior, a 34° , para que no se desprenda el material.

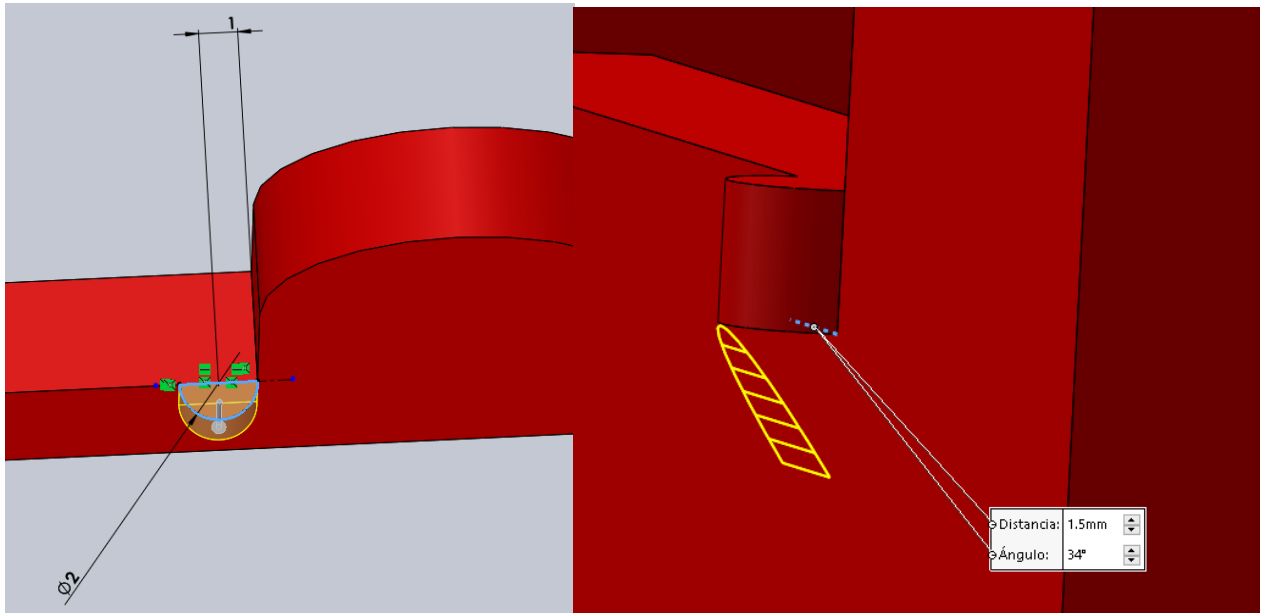


Figura 6.47 A la izquierda: construcción del resalte mediante una extrusión de 1.5mm desde su croquis. A la derecha: construcción del chaflán en su cara inferior.

Para finalizar, se ha incluido un radio de acuerdo en la unión entre las palancas y el resto de la pieza para aumentar su resistencia.

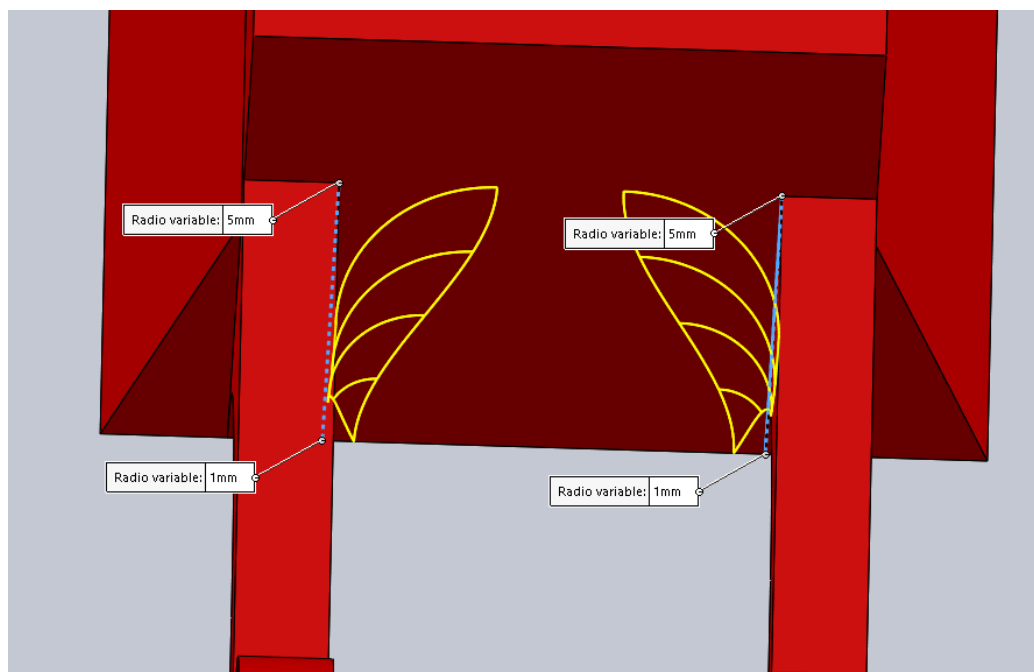


Figura 6.48 Operación redondeo con radio variable.

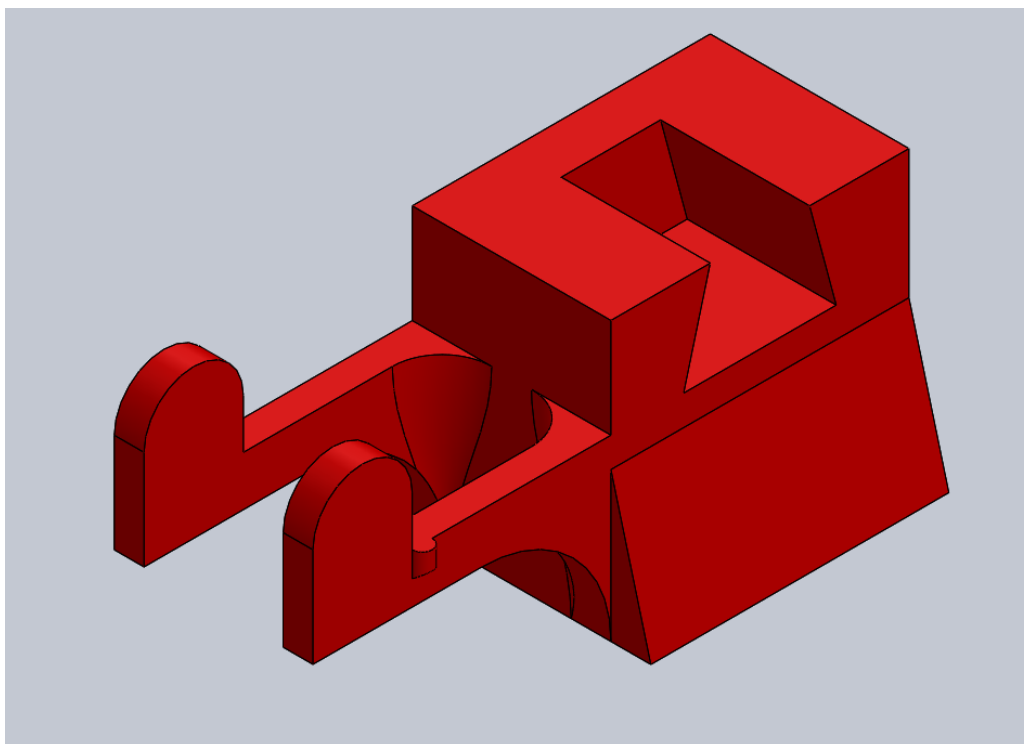


Figura 6.49 Perspectiva de la pieza terminada.

Pieza CR12

Es la guía de la corredera. Esta pieza tiene unas muescas separadas 10mm entre sí para poder determinar la posición adelantada y atrasada en función del volumen de control necesario para cada ensayo.

Para modelar esta pieza, en primer lugar, hay que realizar la extrusión de su perfil.

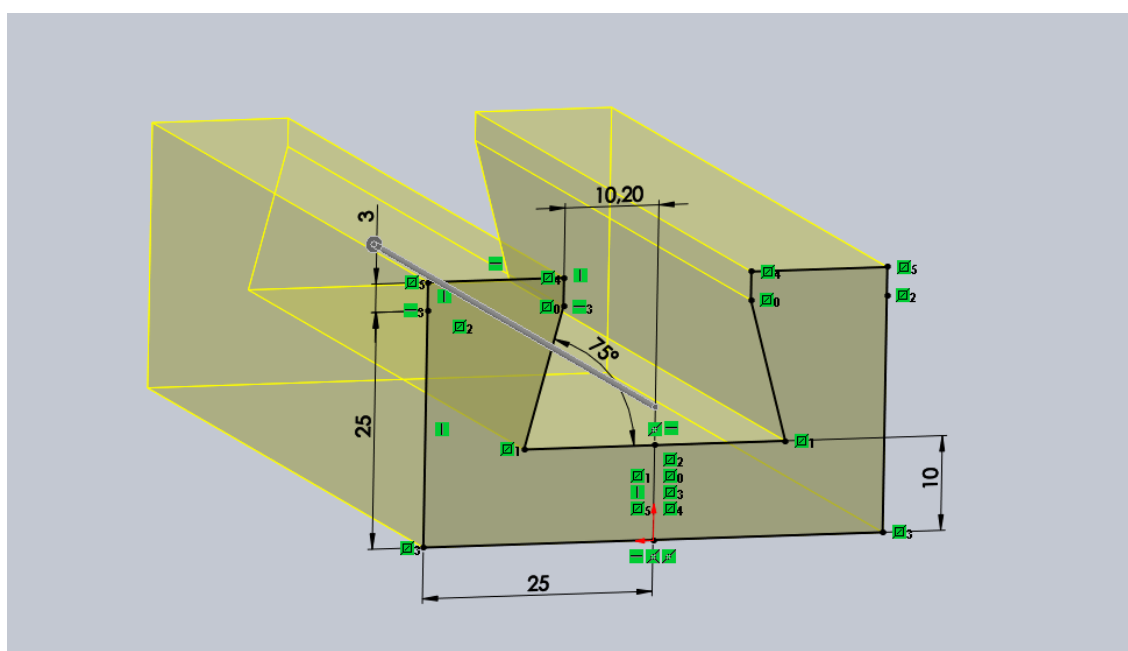


Figura 6.50 Extrusión desde su croquis de la sección de la guía con una longitud de 100mm.

Seguidamente hay que realizar las ranuras que establecen las distintas posiciones longitudinales. Para ello se realiza una de ellas mediante la operación extruir corte y se hacen el resto de ranuras del mismo lado mediante una matriz lineal.

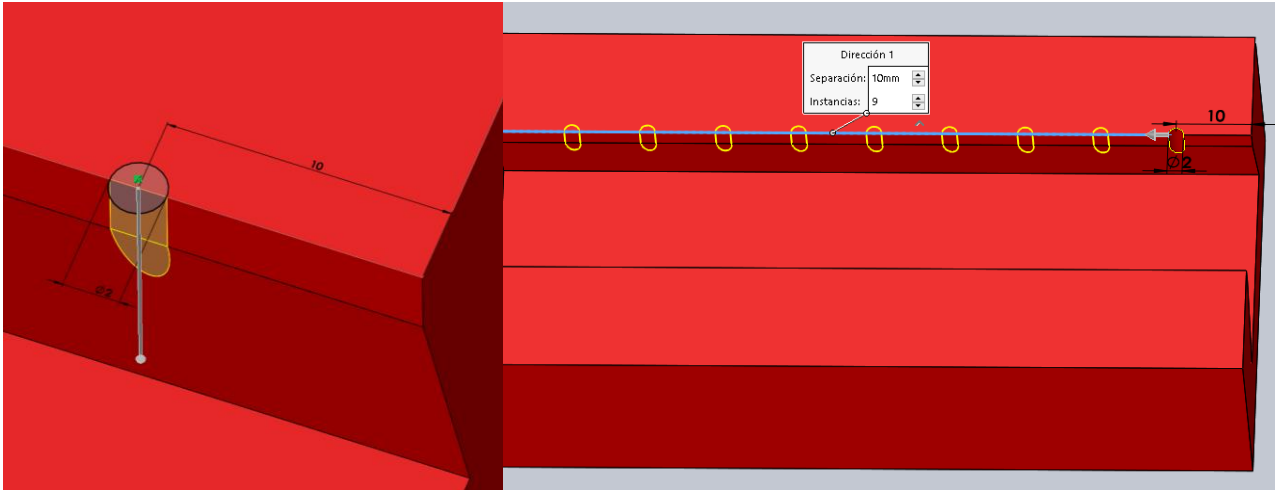


Figura 6.51 A la izquierda: construcción de una de las ranuras mediante corte especificando la profundidad hasta siguiente. A la derecha: construcción de las ranuras de un lateral mediante matriz lineal.

Para terminar la pieza, se le realiza una simetría a la matriz.

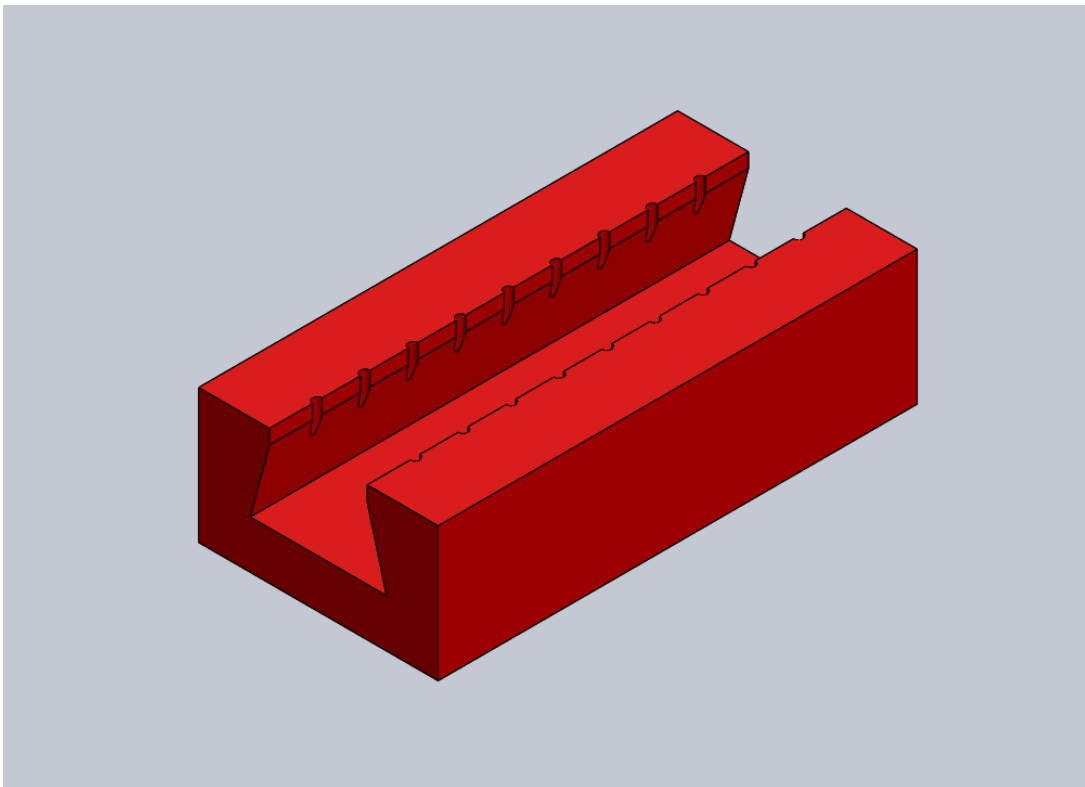


Figura 6.52 Perspectiva de la pieza terminada, incluyendo la simetría de la matriz lineal.

6.2.2 Ensamblaje

El módulo de ensamblajes es la aplicación que permite crear ensamblajes o conjuntos mecánicos de varios componentes diseñados en el módulo pieza. (9)

La creación de un ensamblaje consta de dos etapas. En primer lugar, se importan los componentes del ensamblaje y, en segundo lugar, se establecen las relaciones geométricas de posición entre ellos. (9)

El análisis de un ensamblaje permite estudiar las interferencias, el choque entre los componentes, simular el conjunto mecánico y analizarlo dinámicamente. El objetivo final es detectar diseños defectuosos y ajustarlos para un óptimo funcionamiento del mecanismo. (9)

Para comenzar el ensamblaje, en primer lugar, se identifica la pieza fija, en este caso la pieza CR12, que será la que se incluya primero. Aunque Solid Works por defecto establece como pieza fija la primera que se incluye en el ensamblaje, la orientación o la posición asignada puede que no sea la más adecuada para la elaboración del ensamblaje, ya que los planos coordenados de la pieza no coincidirán con los planos de referencia del ensamblaje. Para cambiar esto, se debe cursar con el botón derecho del ratón sobre el nombre de la pieza en el gestor de diseño y pulsar sobre flotar. Esto elimina las restricciones sobre la pieza, recuperando sus seis grados de libertad. Seguidamente, se añade una restricción de coincidencia entre el origen del ensamblaje y en origen de la pieza. Dentro de esta operación se puede decidir si alinear los ejes de la pieza con los del ensamblaje. Esto hará que cada plano de referencia de la pieza sea coincidente con su homónimo del ensamblaje. Si no se selecciona alinear ejes, sólo se restringirán los desplazamientos, pudiendo rotar libremente la pieza. Esto es útil en el caso de necesitar orientar la pieza de una determinada forma. Para ello se impondrán las relaciones de coincidencia entre los planos que sean necesarios para lograr esa orientación.

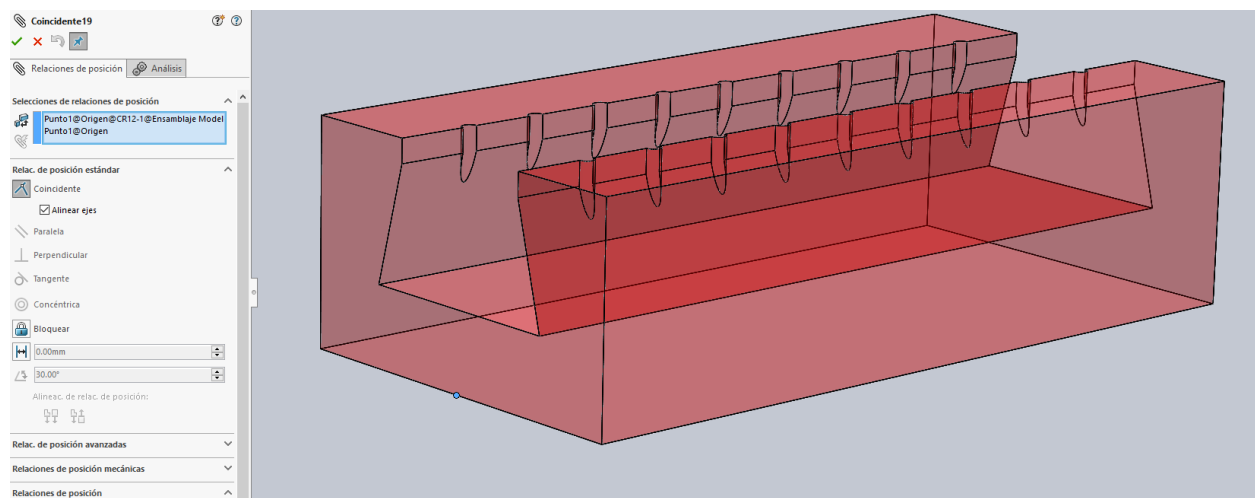


Figura 6.53 Relación de coincidente entre el origen del ensamblaje y el origen de la pieza. Está seleccionada la opción alinear ejes. A la izquierda puede verse el submenú donde se encuentran las relaciones.

Para completar el elemento corredera se inserta la pieza CR11. Esta pieza está centrada en la guía de la pieza CR12. Para lograr esta posición se pueden establecer dos relaciones. Una es la operación anchura, que coloca una pieza en la posición equidistante de dos planos paralelos. Para ello, aparte de seleccionar los dos planos paralelos, es necesario seleccionar dos caras de la pieza paralelas a esos planos. La otra forma de hacerlo es mediante los planos de referencia de ambas piezas, para lo cual fue necesario elegir cuidadosamente los planos sobre los cuales se realizaron las piezas. Gracias a ello, esta posición puede lograrse simplemente haciendo coincidentes los planos de vista lateral de las piezas. Este criterio será prioritario para imponer las relaciones de las restantes piezas, usando como referencia las caras de las piezas solo cuando sea estrictamente necesario.

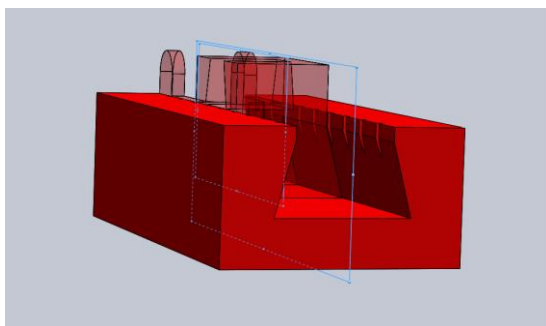


Figura 6.55 Relación de coincidente entre los planos medios de las piezas.

Para crear la relación de corredera se usa la operación distancia límite, dentro de las relaciones avanzadas. En ella se selecciona la cara frontal de la pieza CR12 y la frontal de la pieza CR11. Seguidamente se establecen los valores límite que puede tomar la distancia entre ambas caras. En este caso, el valor mínimo es de 1mm y el máximo de 41mm.

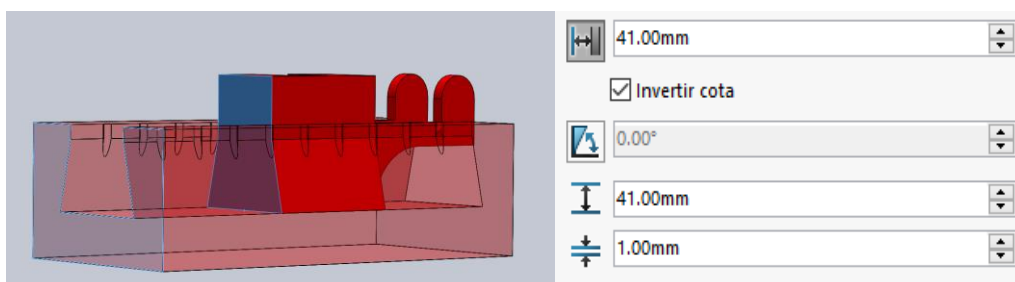


Figura 6.54 Operación distancia límite. A la izquierda: caras seleccionadas para la operación. A la derecha: parámetros para la operación: distancia actual, valor máximo, valor mínimo.

El elemento mástil puede ensamblarse usando solo relaciones de coincidencia entre los planos de referencia y las caras. Este elemento tiene dos posiciones, vertical e inclinado. Estas dos posiciones se crean mediante las configuraciones, pero se realizará al finalizar el ensamblaje, ya que, de hacerlo en este punto, habrá que activar las operaciones sucesivas que sean comunes para ambas configuraciones en el ensamblaje sobre el que no se realicen. Esta configuración inicial se establecerá como la posición vertical. Para ello se impondrán las relaciones de coincidencia entre la pieza CR11 y la cola de milano relativa a la posición vertical de la pieza M12.

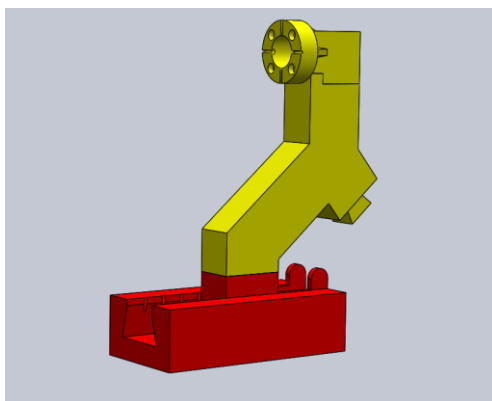


Figura 6.56 Elemento corredera y elemento mástil ensamblados

Para completar el ensamblaje falta colocar las piezas del elemento carcasa. La primera pieza a insertar es la C12. Para colocar esta pieza se hace concéntrico el eje con el agujero de la pieza M11 y coincidentes las caras donde van colocados los imanes.

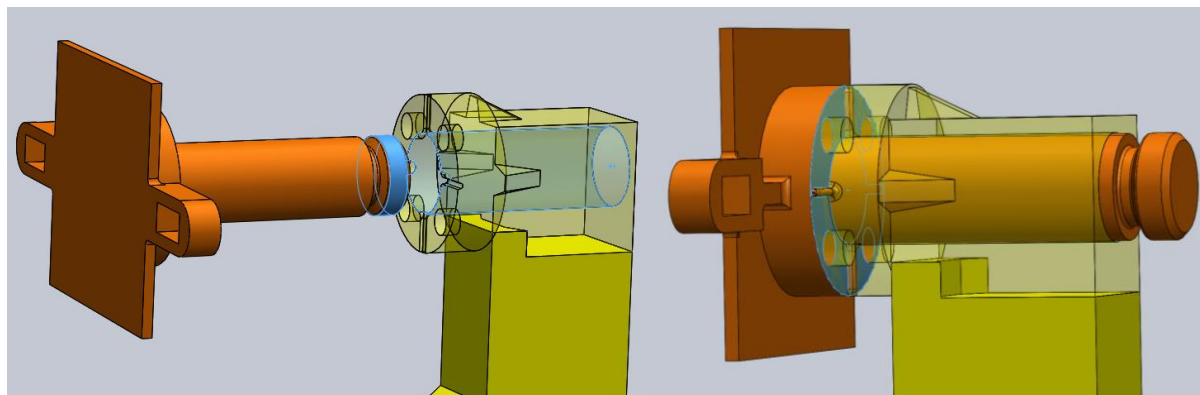


Figura 6.57 A la izquierda: relación de concentricidad entre el eje y su agujero. A la derecha: relación de coincidente entre las caras.

La siguiente pieza a insertar es la C11. Esta se coloca fácilmente mediante relaciones de coincidencia entre sus planos de referencia y los planos de referencia de la pieza C12 y entre las caras coplanarias a la cara posterior del cubo de calibración.

A continuación, se puede insertar la pieza C14. Esta pieza es concéntrica al eje de la pieza C12 y va colocada la ranura del extremo, para lo cual se puede usar la relación de coincidencia entre aristas.

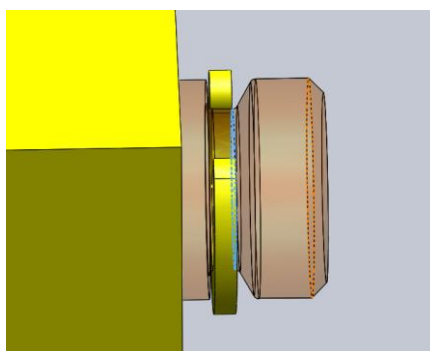


Figura 6.58 Además de caras y planos, las relaciones de coincidente se pueden establecer también entre aristas y entre puntos. En este caso se han relacionado las aristas para colocar la pieza C14.

Finalmente se inserta la pieza C13. Para colocarla se usa la relación anchura, que la centra en el muñón, y relaciones de coincidencia. Una vez colocada la primera, basta con hacer una simetría de la pieza respecto al plano de vista lateral para colocar la restante. Esto se realiza mediando la operación simetría de componentes.

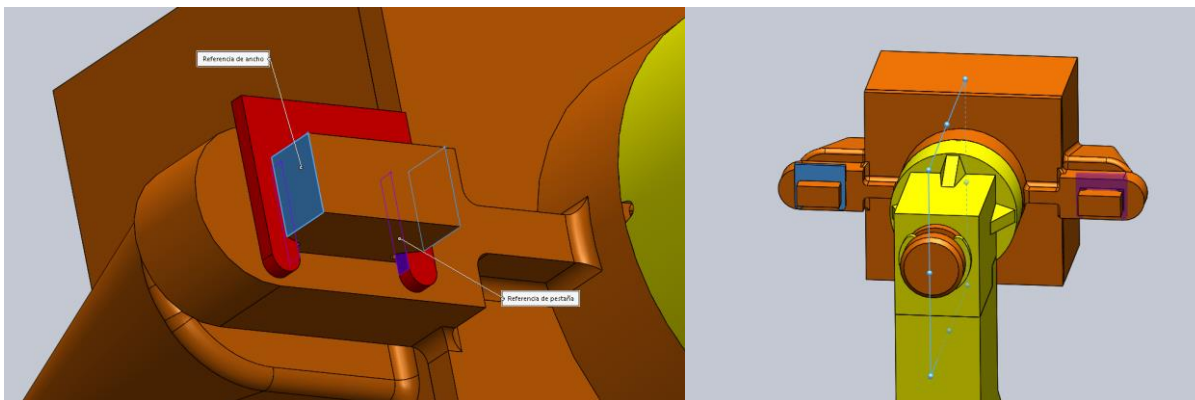


Figura 6.59 A la izquierda: relación anchura. A la derecha: operación simetría de componentes.

Una vez terminado el ensamblaje, se creará la posición inclinado. Para ello se añadirá una nueva configuración, denominada Inclinado, desde el submenú Configuration Manager. En esta configuración se suprimirán las relaciones creadas anteriormente entre la pieza CR11 y la cola de milano relativa a la posición vertical, que serán sustituidas por las correspondientes a la posición inclinado.

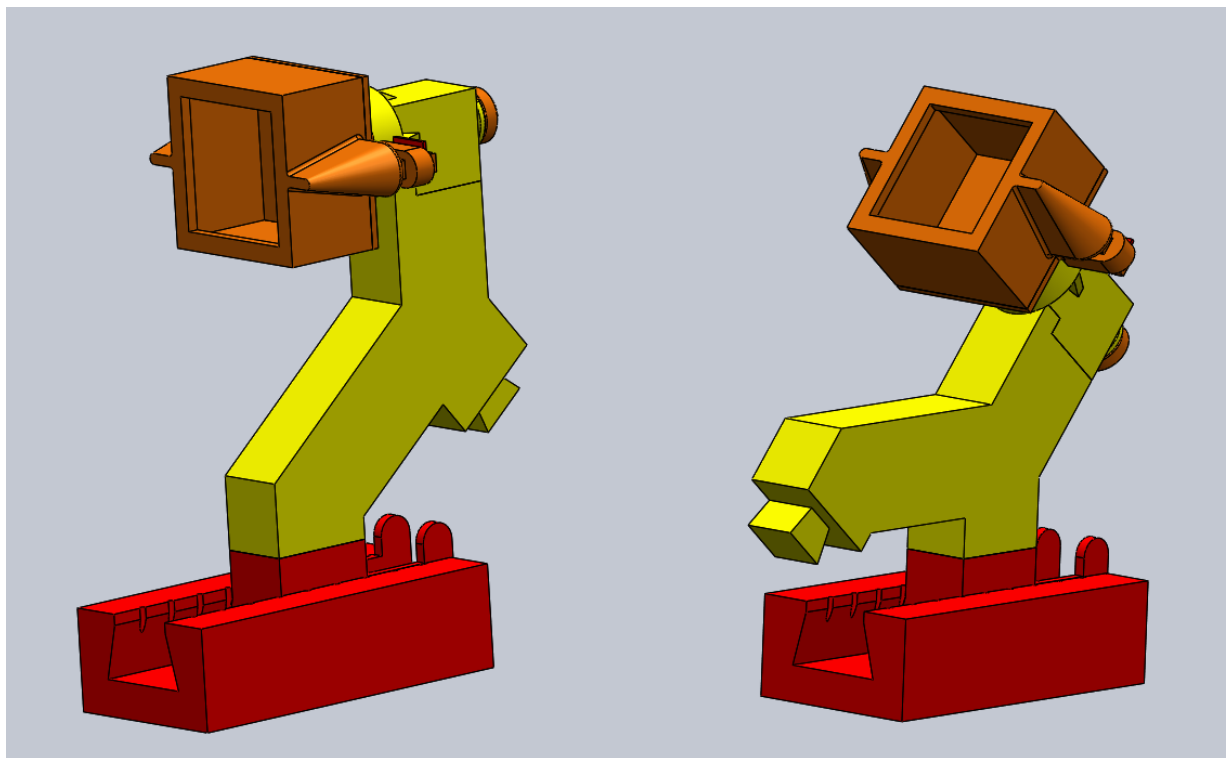


Figura 6.60 Perspectivas del ensamblaje terminado. A la izquierda: posición vertical. A la derecha: posición inclinado.

Por último, se le realiza un análisis de interferencias mediante la herramienta detección de interferencias para garantizar que todas las piezas encajan correctamente. El resultado de este análisis son pequeñas interferencias de 0.02mm^3 entre las piezas C13, C14 y la pieza C12, interferencias necesarias ya que se trata de un ajuste a presión.

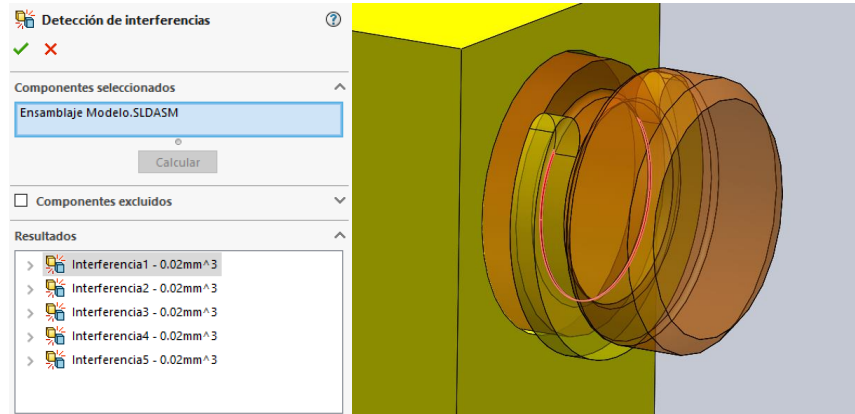


Figura 6.627 A la izquierda: lista de interferencias y su valor. A la derecha: interferencia 5: entre pieza C14 y C12.

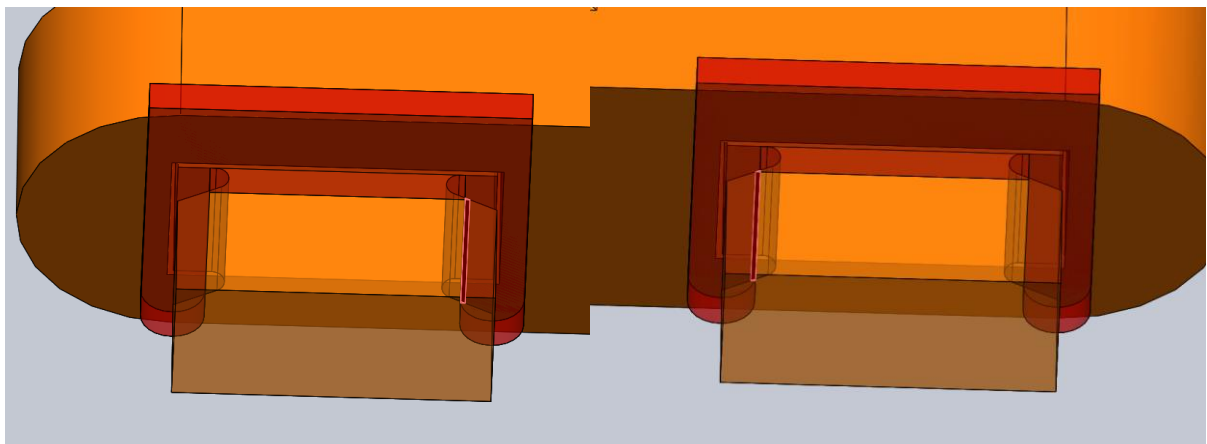


Figura 6.618 A la izquierda: interferencias 1 y 3 entre las piezas C13 (simétricas) y C12. A la derecha: interferencia 2 y 4 entre las mismas piezas.

El último paso a realizar en Solid Works es exportar las piezas como archivo STL.

Al guardar un archivo como STL se puede determinar la calidad con la que se realizara la conversión y sus unidades en el submenú opciones. En la ventana de opciones se establece el milímetro como la unidad del archivo y se ha usado la resolución de alta calidad.

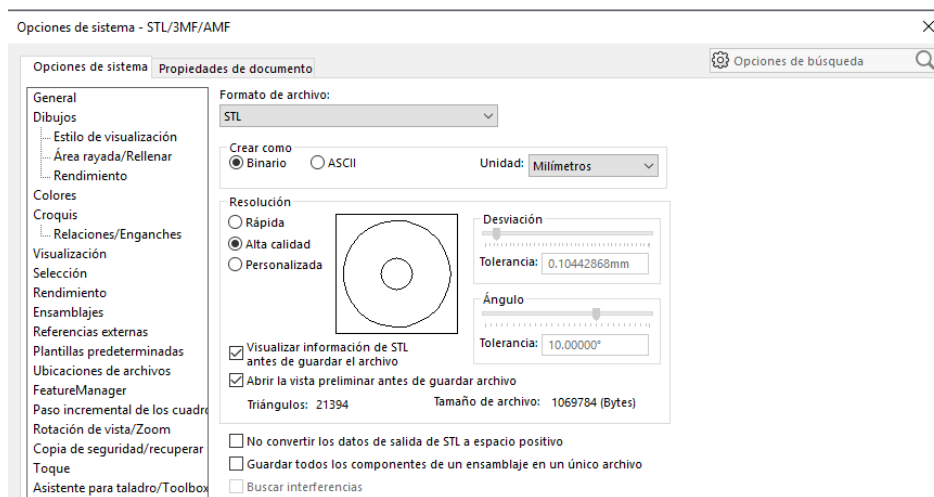


Figura 6.63 Ventana de opciones para los archivos STL.

6.2.3 Impresión

Al tratarse de un primer diseño que no entrará en servicio, se decidió utilizar unos parámetros de impresión que primen la velocidad en decremento de la calidad superficial y resistencia mecánica. En primer lugar, se describen los parámetros que fueron comunes para todas las piezas, explicando detenidamente los que difieren.

La altura de capa se determinó en 0.25mm y el recuento de capas sólidas superiores e inferiores en dos. La temperatura de impresión se estableció en 200°C y la de la cama caliente en 60°C. El porcentaje de relleno se fijó en el 20%, usando un patrón en forma de rejilla. Se habilitaron las retracciones con un valor de 5mm a una velocidad de 40mm/s. La velocidad de impresión fue de 60mm/s y la de desplazamiento de 120mm/s. Para comprobar si había problemas de adherencia se decidió no usar ninguna de las opciones que mejoran la adherencia en la sección dedicada a ella, por lo que se utilizó la opción falda con dos líneas, solo para limpiar la boquilla antes de la impresión de la pieza.

Las piezas C11, C12, M11, M12 y CR12 se tratan de piezas grandes que no estarán sometidas a ningún tipo de esfuerzo. Por lo tanto, se decidió usar solo una línea para su perímetro. Al tratarse de piezas con voladizos con una inclinación mayor de 45°² (15), se decidió no usar soportes para su impresión.

² Excepto la pieza C12, impresa sin soportes por los motivos expresados anteriormente.

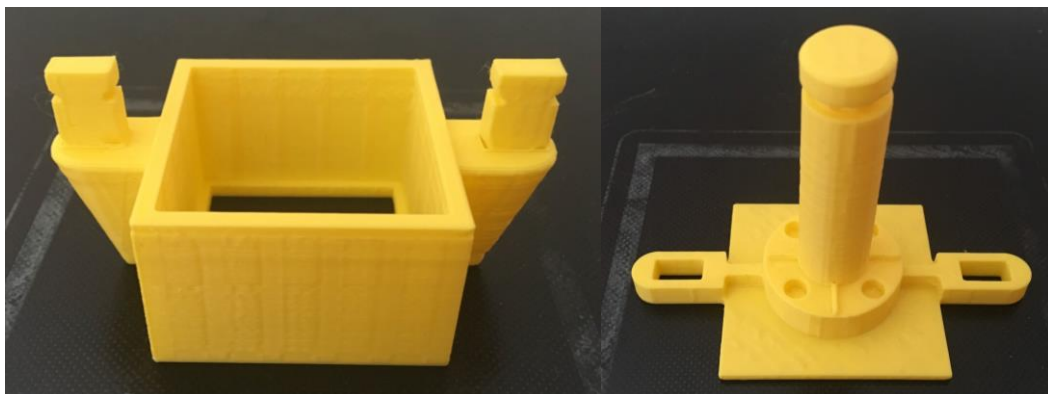


Figura 6.64 Piezas C11 y C12 en su posición de impresión.

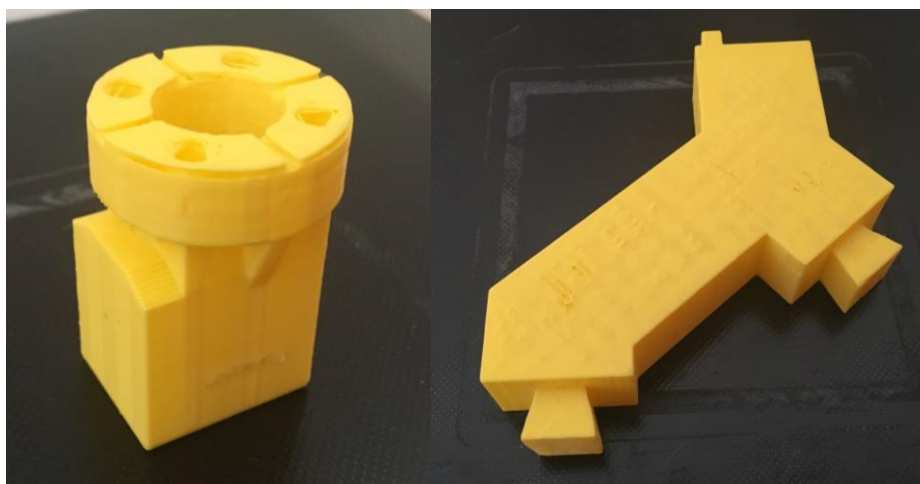


Figura 6.65 Piezas M11 y M12 en su posición de impresión.

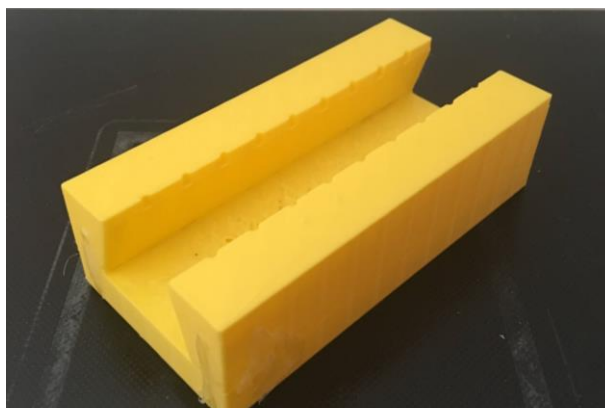


Figura 6.66 Pieza CR12 en su posición de impresión.

Las piezas C13 y C14 apenas tienen relleno debido a su altura, por lo que este parámetro no influye en sus propiedades. Como se tratan de piezas pequeñas que serán sometidas a un esfuerzo de flexión debido a su ajuste a presión, se decidió aumentar el número de líneas de la pared a tres. Cabe resaltar que en estas piezas el programa ha realizado cuatro líneas en la falda, aunque estuviera establecido en dos en las opciones. Esto se debe a una opción perteneciente al perfil expert. En ella se determina que la longitud mínima de la línea que constituye la falda es de 250mm, añadiendo las líneas que sean necesarias en el caso de que con el número de líneas establecido no alcance esa longitud.



Figura 6.67 Piezas C13 y C14.

Para el funcionamiento de la pieza CR11 será necesario someter a flexión la parte relativa al sistema de posicionamiento longitudinal. Por ese motivo se decidió aumentar el número de líneas del perímetro a tres. Para imprimir esta parte de la pieza también fue necesario habilitar la opción de generar los soportes. Estos soportes se configuraron para que se construyesen a partir de un ángulo de 45°, con una densidad de relleno del 20% y un patrón en forma de rejilla.

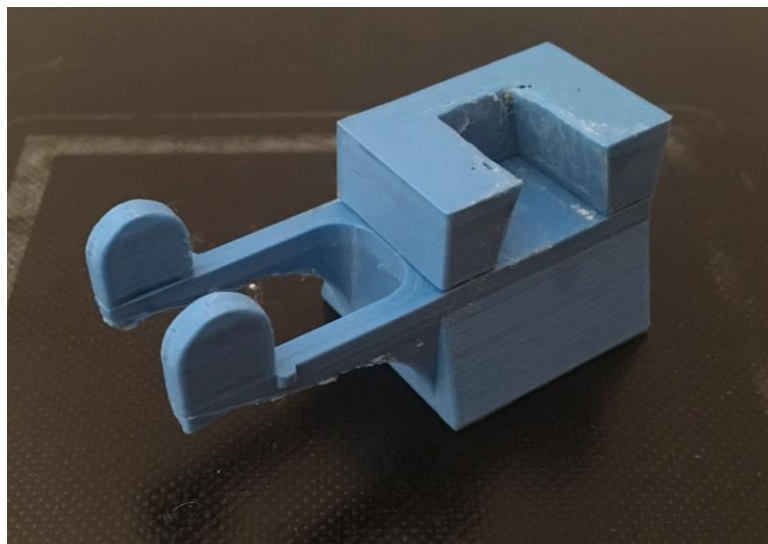


Figura 6.68 Pieza CR11.

Finalmente, se ensamblan las piezas para construir el utillaje.

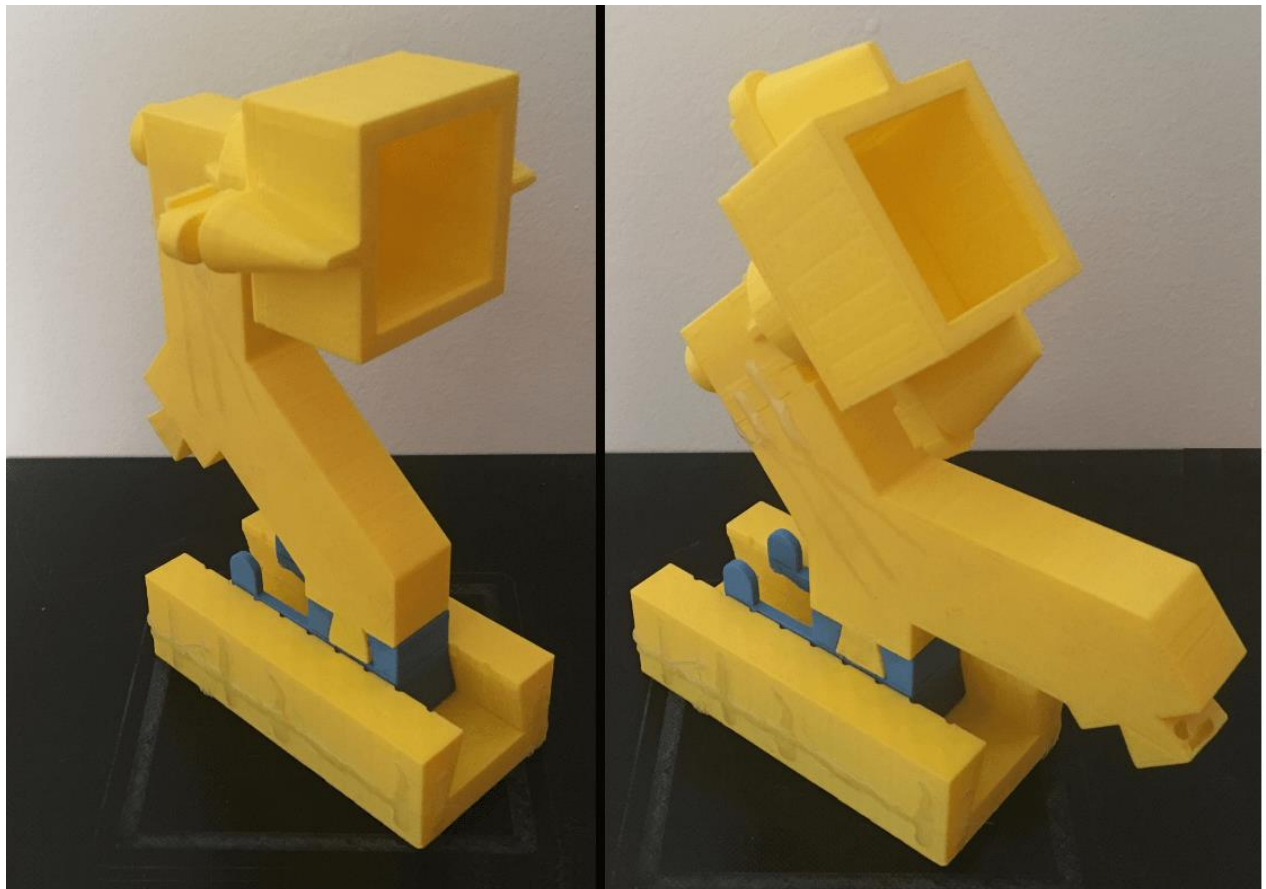


Figura 6.69 Perspectivas del utillaje. A la izquierda en posición vertical. A la derecha en posición inclinado.

6.2.4 Mejoras en el diseño

A continuación, se listan una serie de defectos a corregir en la siguiente versión:

- Pieza M11: Debido a la geometría de esta pieza, la mejor forma para imprimirla es la mostrada en la **Figura 5.61** Izquierda. Sin embargo, en esta posición se debe imprimir una parte en voladizo. A modo de ensayo, se decidió imprimir la pieza sin incluir soportes en el programa de segmentación, para averiguar hasta qué punto era capaz de imprimir la impresora en vacío, sin nada donde apoyar el material. Como era de predecir, el material en la zona del voladizo de desprendió, aunque se pudo terminar la impresión sin que esto afectara significativamente a las capas superiores, por lo que se decidió aprovechar esta pieza. Esto obligó a realizar un rebaje en la pieza M12 donde se encontraba material desprendido.

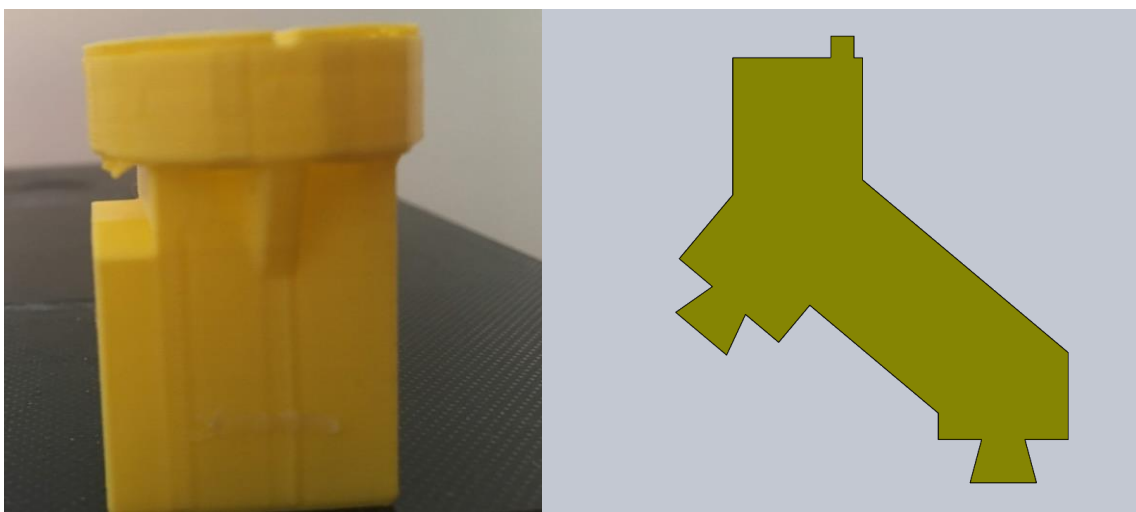


Figura 6.70 A la izquierda: desprendimiento de material en el voladizo sin nervio. A la derecha: pieza M12 con rebaje.

- Unión cola de milano entre pieza M12 y CR11: es un punto probable de fallo debido a la concentración de tensiones causada por la gran reducción de sección originada por la cola de milano y por el tope para encajar alineadamente las piezas.

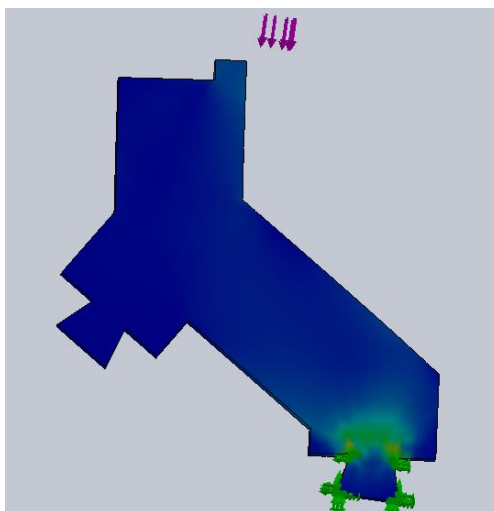


Figura 6.71 Analisis cualitativo mediante elementos finitos.

- Sistema de posicionamiento rotacional: a primera vista, se consideró que los resaltes para determinar las posiciones no podrían ser lo suficientemente resistentes para el uso del utillaje. Esto podría solucionarse en un diseño con las dimensiones reales del cubo, que son bastante superiores a las de este modelo, o con el diseño de un nuevo sistema de posicionamiento.
- Fijación de la carcasa: debido al peso del cubo de calibración existe la necesidad de rediseñar esta unión, ya que la pieza C13 no es lo suficientemente resistente. Nuevamente, este problema podría solventarse al realizar el modelo con las dimensiones reales.
- Rediseñar la pieza CR11: debido a la geometría de esta pieza es imposible imprimirla sin usar soportes. Esto aumenta el tiempo de impresión, el desperdicio de material y, además, introduce un tiempo de pos procesado por la necesidad de eliminar estos soportes. La geometría de esta pieza también provoca un fallo de impresión, por el que se genera una grieta entre el plano horizontal y los elementos superiores, lo que debilita sensiblemente una pieza que estará sometida a un gran esfuerzo debido al peso del cubo y a las vibraciones producidas por la traslación por la corredera. Este es un fallo recurrente en piezas en las que hay que imprimir varios elementos separados sobre un plano horizontal sobre la pieza. Puede ser debido a un aporte de material insuficiente o a un problema en la adaptación de las capas producido por el programa usado para generar el G-code.

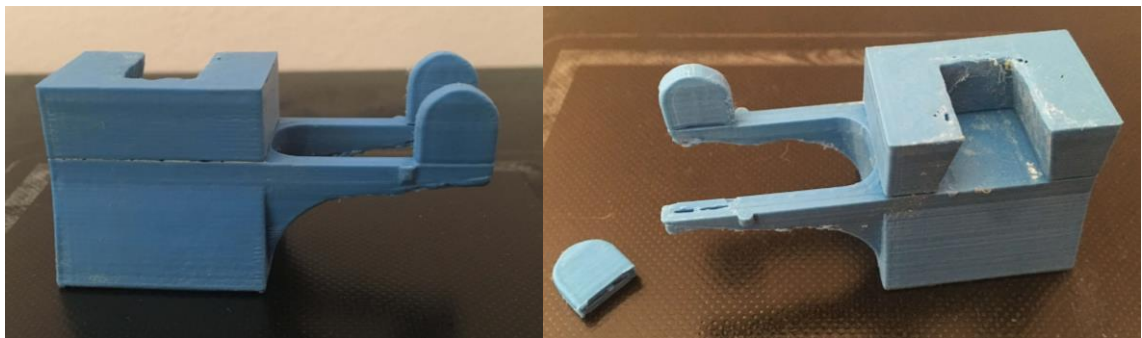


Figura 6.72 A la izquierda: grieta a través del plano horizontal de las palancas. A la derecha: fractura causada por la grieta.

- Rediseñar el sistema de posicionamiento longitudinal para hacerlo más compacto. El actual es ineficiente, desaprovechando la longitud de la guía de la corredera (pieza CR12), obligando a construirla más larga de lo necesario.

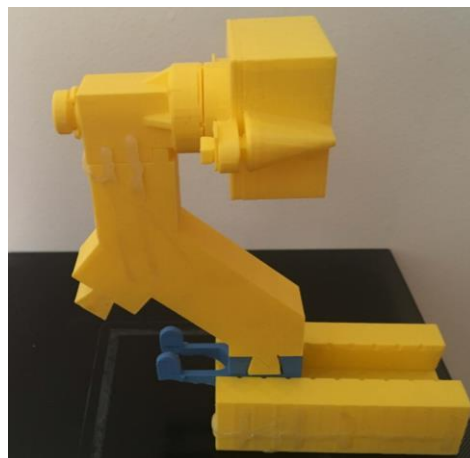


Figura 6.73 Posición más atrasada sin contar con las palancas de la pieza CR11

6.3 Versión 2

Una vez realizado el primer diseño y comprobado que se podían alcanzar las distintas posiciones, se empezó a realizar un nuevo modelo, bajo las condiciones anteriormente nombradas, corrigiendo los defectos y debilidades del primer modelo. Este nuevo diseño ya será una versión operativa, por lo que para su dimensionado se dispone de un modelo del cubo de calibración realizado en aluminio. Este modelo se fabricó con las dimensiones del cubo, pero significativamente más pesado para introducir un coeficiente de seguridad elevado. En la realización de esta versión se ha conservado el juego de 0.4mm para las piezas que deben ajustar.

6.3.1 Modelado

Para el modelado de esta versión y de las siguientes se usan las mismas operaciones ya explicadas en la versión 1, así que se obviarán los pasos intermedios para dotar al texto de mayor fluidez.

6.3.1.1 Carcasa

Este elemento requiere un gran aumento de tamaño para adaptarlo a las dimensiones reales del cubo de calibración.

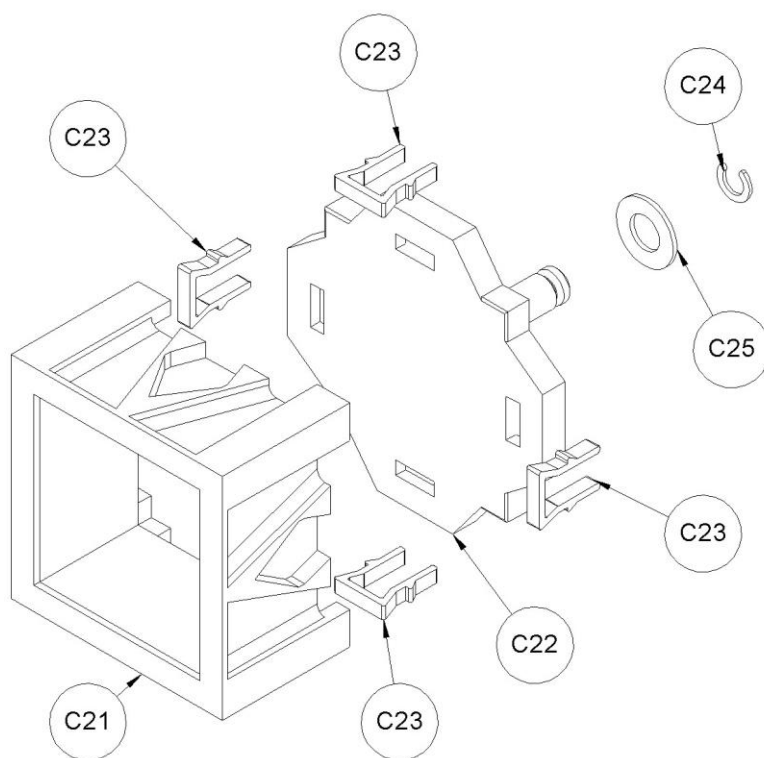


Figura 6.74 Despiece del elemento carcasa.

En un primer momento se intentó ajustar las dimensiones de las piezas C11 y C12 sin introducir mayores modificaciones. Para comenzar el modelado de la nueva pieza C21 se creó el croquis de las paredes sobre el alzado, centrado en el origen. La principal diferencia se encuentra en la forma de las paredes. Para aumentar su resistencia se podría haber hecho una operación lámina con un espesor mayor, lo que supondría un aumento del tiempo de impresión y de material. Para reducir ambos, se ha decidido usar un espesor de 3mm y un marco de 10mm de espesor. También se ha aumentado el espesor de las esquinas por ser una zona expuesta a posibles golpes.

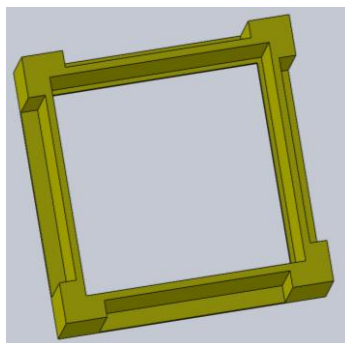


Figura 6.75 Pieza C21 con las paredes aligeradas.

Otra diferencia es que para este modelo se han generado cuatro muñones en vez de dos. Esto se ha realizado mediante la operación patrón circular, para la cual ha sido necesario crear un eje en la intersección de los planos Planta y Vista lateral.

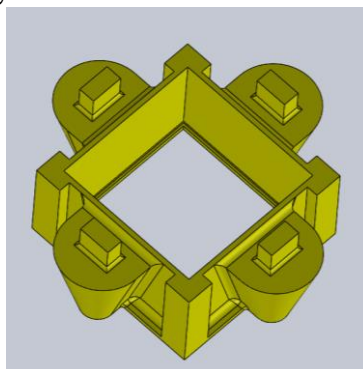


Figura 6.76 Perspectiva de la pieza C21 con sistema de fijación de mayor tamaño.

Sin embargo, debido al peso del modelo del cubo de calibración, es necesario aumentar las dimensiones del sistema de fijación diseñado anteriormente, lo que incrementa considerablemente el espacio necesario para rotar el cubo, necesitándose para ello aumentar la altura del mástil.

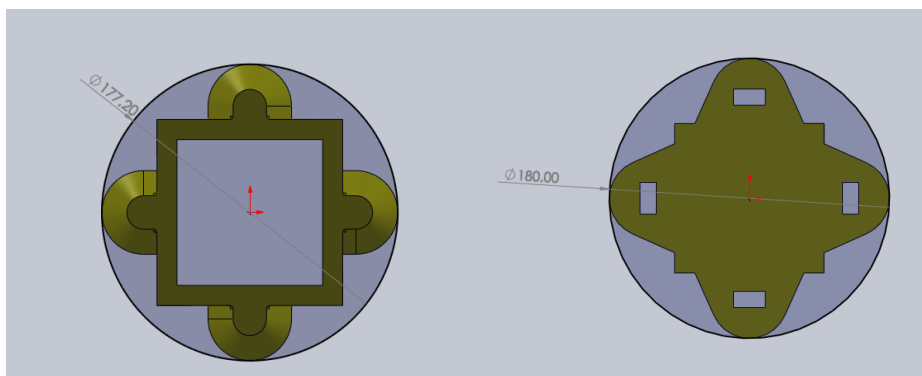


Figura 6.77 Vista frontal de la pieza C21 y de la pieza C22, adaptada a las dimensiones de los muñones. Puede apreciarse el gran tamaño que poseen estas piezas en comparación con el que ocupa el patrón.

Con el objetivo de encontrar un equilibrio entre resistencia y espacio se rediseñó el anterior sistema de fijación y se cambiaron por un sistema de cuatro pinzas, inspirado en los broches de las mochilas, que mantienen unidas las piezas C21 y C22, y unos resaltes en las esquinas de la pieza C21 que encajan en las esquinas de la pieza C22. Los huecos donde van alojadas las pinzas se crearon mediante la extrusión de un croquis creado sobre la pared de la pieza C21 al que se le realizó un patrón circular para obtener los cuatro. Para que no hubiera problemas durante la impresión, el croquis se prolongó hasta la base de la pieza, usando voladizos con ángulos menores de 45° . Además, se creó en forma de flecha para facilitar la orientación hacia las cámaras.

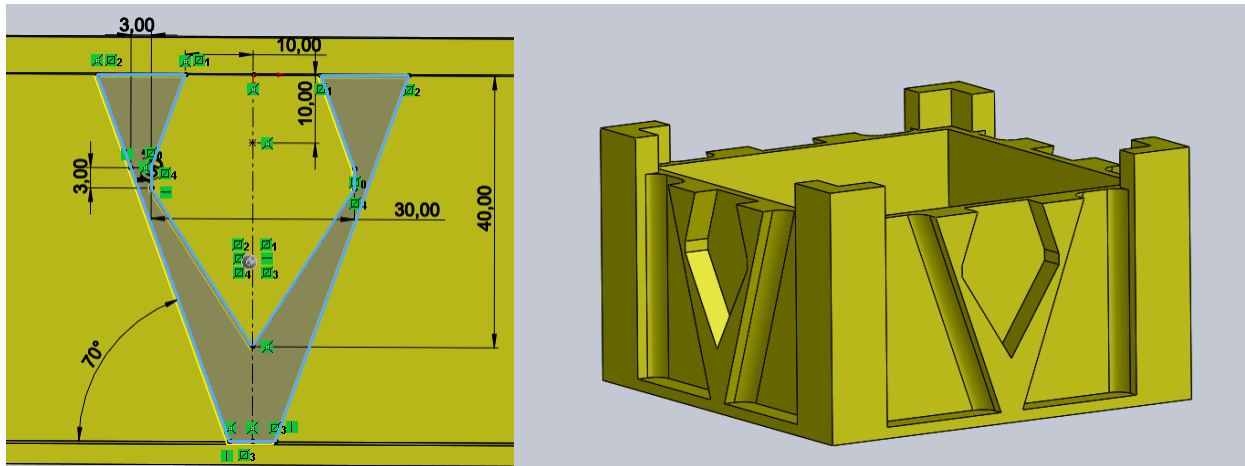


Figura 6.78 A la izquierda: croquis para construir el hueco donde se alojan las pinzas.
A la derecha: perspectiva de la pieza C21 con el nuevo sistema de fijación.

Las cuatro pinzas de este nuevo sistema son semejables a los pasadores del anterior, por lo que en adelante se denominarán como la pieza C23. Para el diseño de la pieza C23 se pretendió que tuviera unas dimensiones adecuadas para su manipulación y una buena relación entre resistencia y rigidez, ya que se debe poder colocar con los dedos. En su modelado se aprovechó la simetría para realizar el croquis solo de la mitad de la pieza. Para realizar la pieza se realizaron algunas hipótesis que serían necesarias comprobar una vez impresa. En primer lugar, se decidió probar si un resalte de 3mm con un ángulo de 60° es suficiente para sostener el peso del cubo. En segundo lugar, estableció el espesor de la pieza en 5mm, dejando un hueco interior de 10mm para la retracción durante su colocación.

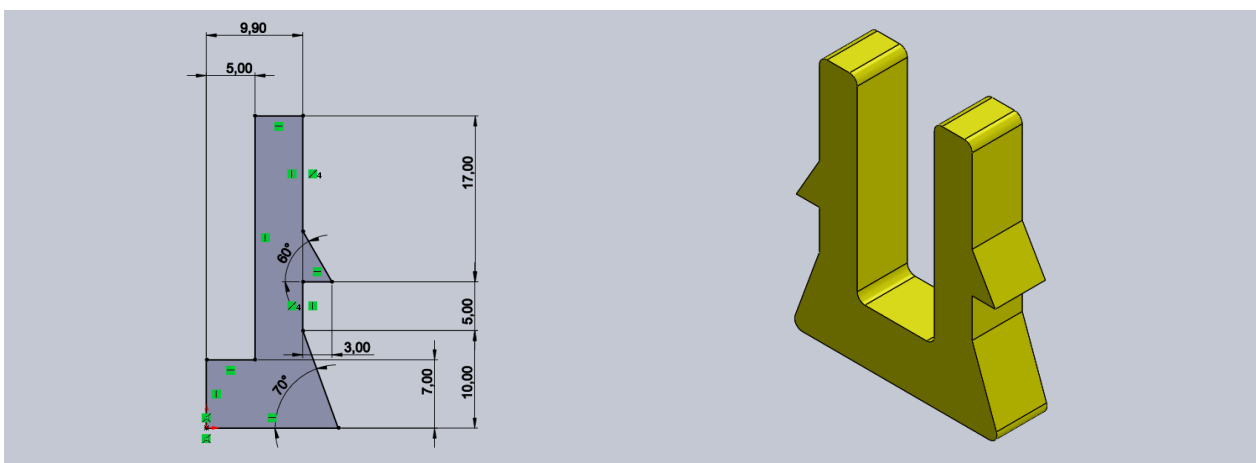


Figura 6.79 A la izquierda: croquis de la pieza C23. A la derecha: perspectiva de la pieza C23.

Con este diseño se ha conseguido disminuir el diámetro de la circunferencia circunscrita en 23mm, lo que implica una reducción aproximadamente de 10mm en la altura del mástil.

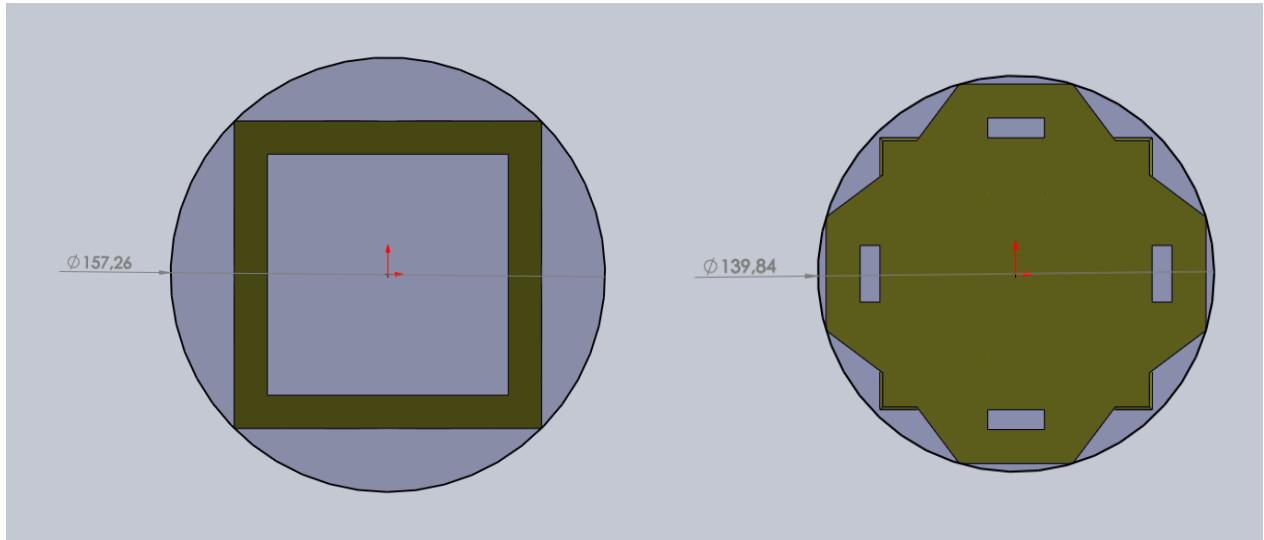


Figura 6.80 Vista frontal de la pieza C21 y de la pieza C22 con el nuevo sistema de fijación por pinzas.

El sistema de posicionamiento rotacional también ha sido rediseñado con el objetivo de hacerlo más robusto. Para ello se han eliminado los pequeños resaltes y se han cambiado por un pasador accionado por un resorte, por lo que ya no son necesarios los imanes para asegurar las posiciones. El pasador, denominado en adelante como pieza M23, desliza sobre una ranura realizada sobre la parte superior del mástil y encaja en una serie de hendiduras espaciadas 90° elaboradas sobre la parte posterior de la pieza C22. El modelado del sistema de posicionamiento rotacional comenzó por la creación del cilindro base dónde van talladas las hendiduras. Este cilindro tiene un diámetro de 60mm y una altura de 20mm. Para crear las hendiduras fue necesario construir un plano tangente al cilindro sobre el cual se trazó el croquis de una de las hendiduras. Este croquis se usó para la operación extruir corte con una profundidad de 5mm. Una vez creada una, se le aplicó un patrón circular para obtener las restantes. Sobre el cilindro base se construyó el eje sobre el que se realiza la rotación. El eje conserva el diámetro de 15mm de la versión anterior, ya que, en esta ocasión, se usarán los parámetros de impresión necesarios para otorgarle la resistencia adecuada. Entre el eje y el cilindro base se construyó un radio de acuerdo de diámetro 5mm para disminuir la concentración de tensiones.

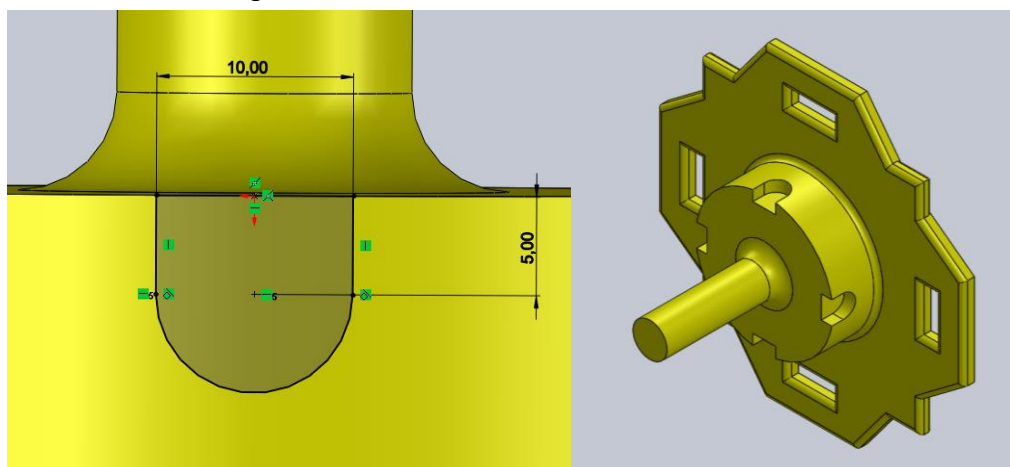


Figura 6.81 A la izquierda: croquis de la ranura para el sistema de posicionamiento rotacional. A la derecha: perspectiva de la pieza C22.

Debido a la gran superficie de la base de la pieza C22 se decidió usar nervios para reforzarla y aligerarla. De este modo se reduce también el tiempo de impresión. Para realizar estos nervios, en primer lugar, se realizó un marco cuadrado sobre la parte que cubre el cubo mediante una operación de extrusión lámina de 5mm de espesor y 7mm de altura. Sobre ese marco se realizaron los nervios de forma radial hacia el cilindro base. Por último, mediante una operación de extrusión lámina y un patrón circular de la misma, se creó el marco de la zona donde encajan las pinzas, quedando todo el perímetro de la pieza reforzado.

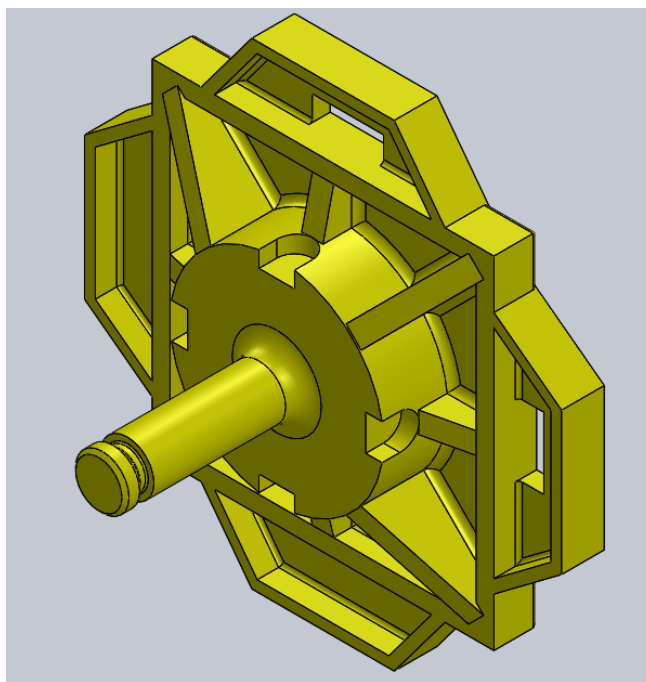


Figura 6.82 Perspectiva de la pieza C22 incluyendo los nervios de refuerzo.

Como consecuencia del elevado número de horas de impresión de la pieza C22 y del conjunto de piezas que forman el mástil, se introduce una nueva pieza, denominada C25. Esta pieza es una arandela para ajustar el juego entre la pieza C22 y la pieza M21. Se ha decidido incluirla para facilitar el ajuste en el caso de ser necesario imprimir estas piezas con una impresora distinta. Para ello, una vez ensambladas las piezas C22, M21 y M23, será necesario medir el juego entre ellas y modificar el espesor de la pieza C25 de tal forma que garantice el ajuste.

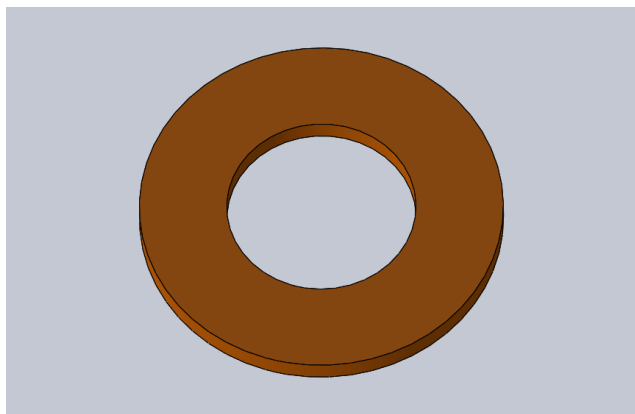


Figura 6.83 Perspectiva de la pieza C25.

Para finalizar con las piezas del elemento carcasa cabe señalar que la pieza C14 no ha sufrido modificaciones, pero para continuar con la nomenclatura de esta versión, esta pieza se denominará C24.

6.3.1.2 Mástil

Este elemento conserva la forma respecto a la versión 1, adaptándola a las nuevas dimensiones, aunque se introducen algunos cambios como el sistema de posicionamiento de las rotaciones anteriormente citado y el sistema de posicionamiento longitudinal, donde se elimina la corredera en forma de cola de milano. Para realizar el modelado se requirió modificar las dimensiones del diseño realizado en AutoCAD, incluyendo las dimensiones de la carcasa.

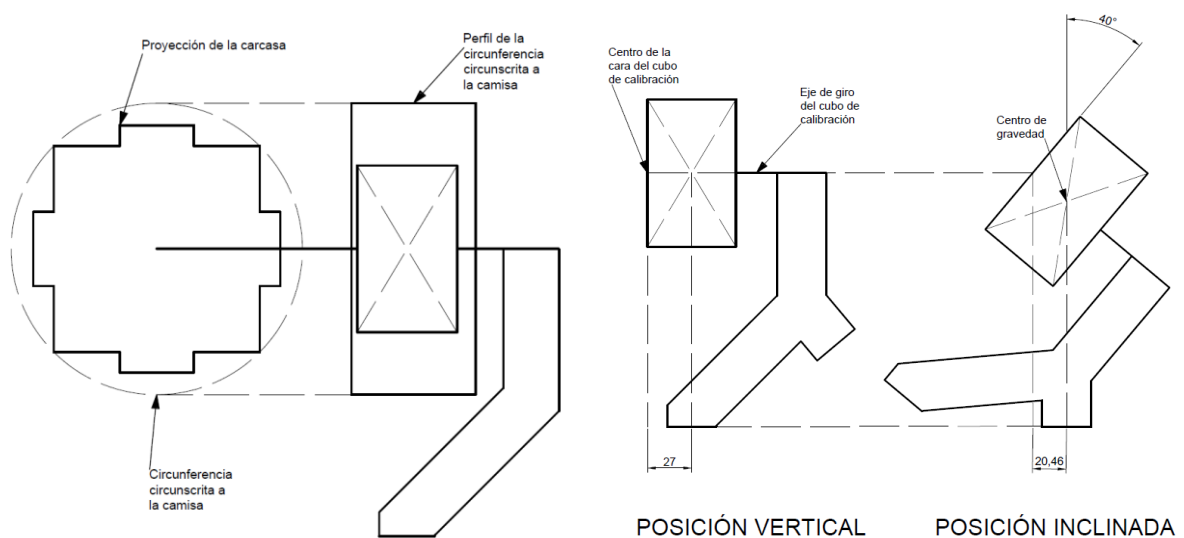


Figura 6.85 Proceso del diseño gráfico del mástil incluyendo las dimensiones de la carcasa.

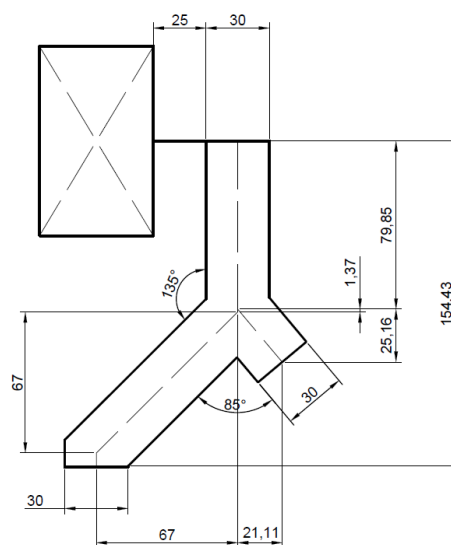


Figura 6.84 Dimensiones del elemento mástil

Las dimensiones obtenidas de la **Figura 6.84** sirven de base para realizar los croquis de las piezas M21 y M22.

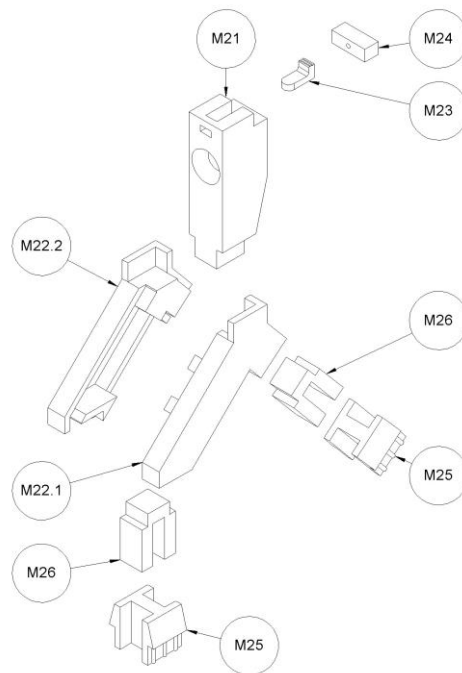


Figura 6.86 Despiece del elemento mástil.

La pieza M21 ha sido rediseñada debido al cambio en el sistema de posicionamiento rotacional. La nueva geometría está pensada para poder imprimir la pieza sin voladizos, por lo que ya no se producen los desprendimientos de material ocasionados en la pieza M11. Esta versión incluye la ranura en la parte superior por la que desliza la pieza M23. Para modelar esta pieza se partió de un croquis rectangular de 90mm de largo y 30mm de ancho, al que se le realizó una extrusión de 40mm, necesarios para alojar la pieza M23. Sobre la cara frontal se realizó el agujero para el eje, de diámetro 15.4mm, a una cota de 60mm, quedando por lo tanto 30mm por la parte superior, que es justamente el radio del cilindro base sobre el que están talladas las hendiduras en la pieza C22. Sobre esa misma cara se le realizó un chaflán asimétrico de profundidad 10mm y anchura 5mm al agujero, para poder alojar el radio de acuerdo que hay entre el eje y el cilindro base de la pieza C22.

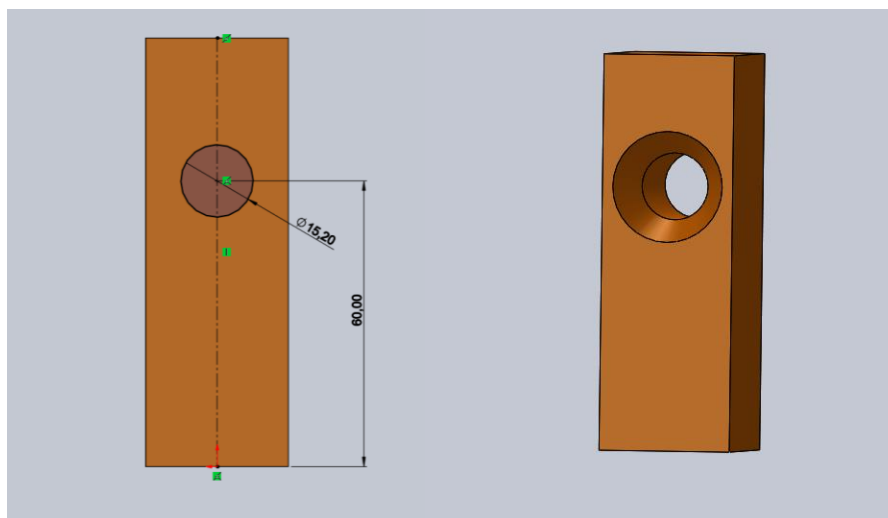


Figura 6.87 A la izquierda: croquis para realizar el orificio para el eje. A la derecha: perspectiva de la pieza M21 con el orificio.

Antes de terminar el modelado de la pieza M21 fue necesario modelar la pieza M23, ya que se necesita conocer sus dimensiones para realizar la ranura superior. Para determinar la longitud de la pieza M23 se debe tener en cuenta la longitud de la hendidura de la pieza C22, que es 10mm. También se necesita crear un marco en la pieza M21 para sostenerla. A este marco se ha decidido otorgarle un espesor de 5mm. Por último, es necesario incluir un tirador para poder mover la pieza con el dedo. Para que sea cómodo de manipular se le ha dado un espesor de 5mm además de incluir un radio de acuerdo de 2mm para que exista un pequeño hueco entre este y la pieza M21. Sumando todas estas longitudes se obtiene una medida de 22mm, sin embargo, se ha decidido aumentar un milímetro la longitud del pasador para asegurar que se ejerce presión sobre la pieza C22 y de este modo eliminar juegos. Así que, finalmente, la longitud de la pieza es de 23mm. Debido a que se trata de una pieza móvil se decidió aumentar el juego de 0.4mm a 0.6mm, por lo que la pieza tiene un ancho de 9.4mm. No obstante, debido a la mayor precisión con la que cuenta el eje Z de la impresora³, se decidió mantener el juego vertical, por lo que la extrusión se realizó con una altura de 4.6mm. El tirador se extruyó hasta una altura de 6mm y se añadieron unos pequeños resaltes para dotarlo de rugosidad y no resbale al tacto. Para finalizar, se añadió un orificio en la cara posterior de 3mm de diámetro y 3mm de profundidad a una cota de 5mm. Este orificio sirve para introducir una pequeña varilla de metal que sirva para sostener el resorte.

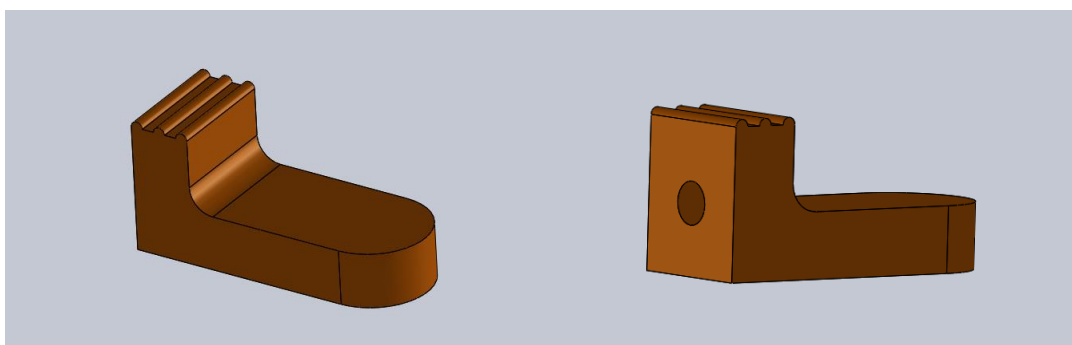


Figura 6.88 Perspectivas de la pieza M23.

Una vez terminada la pieza M23, se reanudó el modelado de la pieza M21 con la construcción de la ranura sobre la que desliza la pieza M23. Para ello se realizó el croquis de la sección del pasador sobre la cara frontal de la pieza y se usó la operación extruir corte con una profundidad de 28mm, que es la suma de la longitud de la pieza M23 y la longitud del muelle completamente comprimido, unos 5mm. Seguidamente se añadió el marco que sostiene la pieza M23 y se eliminó el escalón producido por la ranura, de tal forma que no se produzcan voladizos, aunque eso conlleva la necesidad de elaborar una pieza nueva.

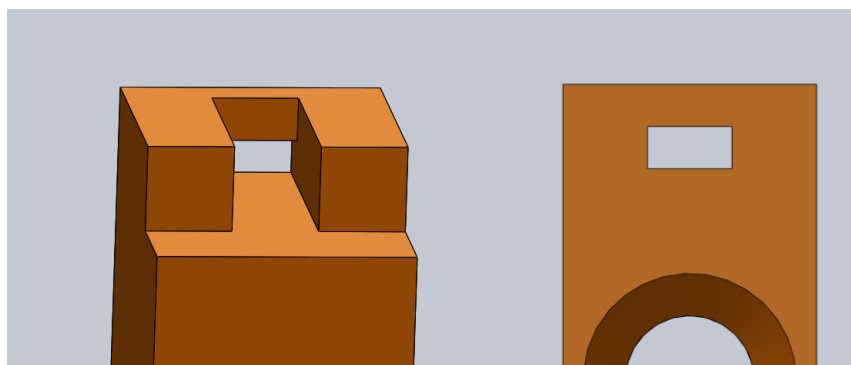


Figura 6.89 Vistas de la ranura de la pieza M21 sobre la que desliza la pieza M23.

³ Los ejes X e Y realizan movimientos más rápidos mediante correas, lo que causa fuerzas de inercia y deformación de las correas, y el eje Z movimiento lento mediante husillo.

Finalizada la parte superior de la pieza, falta por modelar el sistema de unión entre la pieza M21 y la pieza M22. Para ello se decidió que el espesor de estas piezas sería de 5mm y se construyó un cubo sobre el cual irían pegadas. Por último, se creó un chaflán para adaptar los 40mm de ancho de la pieza M21 a los 30mm de la pieza M22.

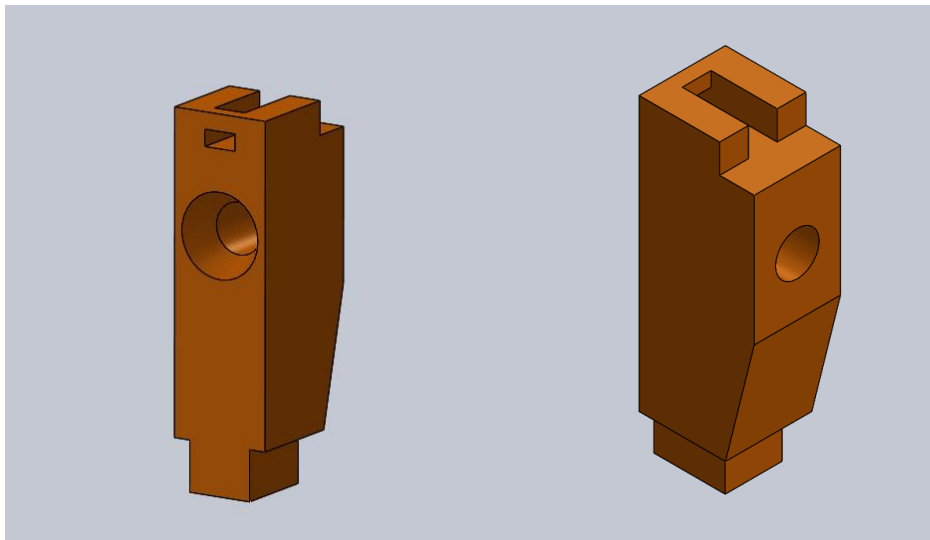


Figura 6.90 Perspectivas de la pieza M21.

Para completar el sistema de posicionamiento rotacional será necesario incluir una nueva pieza, denominada M24, encargada de sostener el resorte. Esta pieza tiene un orificio pasante de 3mm de diámetro en el plano central a una cota de 5mm. Este orificio sirve para introducir un tornillo que sostiene el resorte. La decisión de incorporar un tornillo se debe a facilitar el recambio de la pieza M23 en caso de rotura.

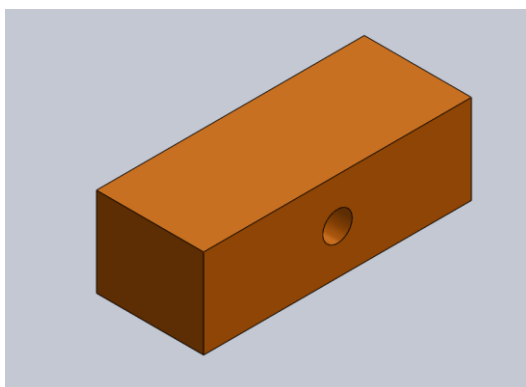


Figura 6.91 Perspectiva de la pieza M24.

La pieza M22 se ha decidido fabricar en dos partes. La parte izquierda será la M22.1 y la parte derecha la M22.2. Esta decisión se debe fundamentalmente a dos motivos.

El primero es el de aumentar la resistencia de estas piezas. Si se realiza un estudio mediante elementos finitos del mástil puede comprobarse que fundamentalmente está sometido a flexión. Esto se evidencia al ver que las mayores tensiones se producen en las partes exteriores del mástil y que la parte central apenas está cargada.

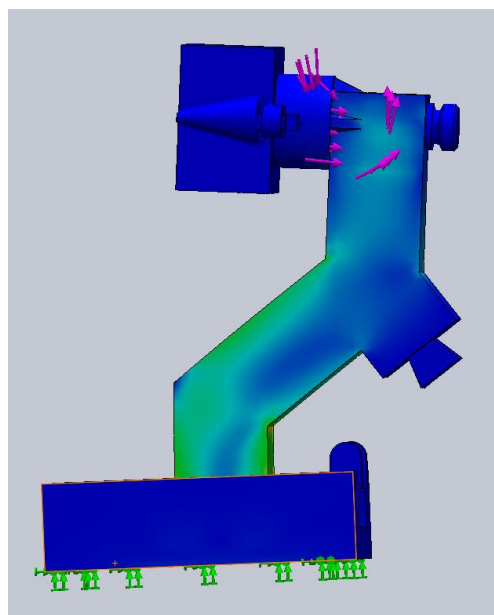


Figura 6.92 Análisis mediante elementos finitos. El peso del patrón de calibración se ha trasladado al mástil como una fuerza y un momento.

Teniendo esto en cuenta se han diseñado las piezas en forma de perfil en U. De este modo se consigue un mayor aprovechamiento del material y aumentar el número de paredes en esa zona, ya que en el proceso de impresión se puede decidir el número de líneas que tendrá esa pared y por tanto modificar localmente la resistencia de la pieza sin tener que aumentar el relleno de toda la pieza como sucedería con la pieza M12 de la primera versión.

El segundo motivo es el de generar una geometría que se pueda imprimir sin necesidad de usar soportes, ya que de hacerla en una sola pieza se necesitarías soportes para poder generar los huecos donde se ensambla el nuevo sistema de posicionamiento longitudinal.

Para modelar estas piezas se creó en primer lugar la geometría que es común y posteriormente desde el ensamblaje se obtuvo la pieza simétrica. Las dimensiones del croquis para crear el perfil de la pieza se obtienen de la **Figura 6.84**. Hay que tener en cuenta que, a la cota mayor, que es la medida desde la base hasta el eje, hay que restarle 60mm que le pertenecen a la pieza M21, por lo tanto, la altura de la pieza M22 es de 94.43mm. Una vez creado el croquis se le realizó una extrusión de 5mm, espesor anteriormente indicado. Las paredes de la pieza se realizaron mediante una operación de extrusión lámina de 5mm también. El croquis de esta operación se realizó por todo el perímetro de la pieza excepto por las zonas donde se encajan las otras piezas. Por último, se creó el hueco donde encaja el cubo para la unión con la pieza M21. Este hueco se podría haber creado en el croquis de la operación lámina, pero se decidió hacerlo en una operación adicional para mayor facilidad ante una posible modificación.

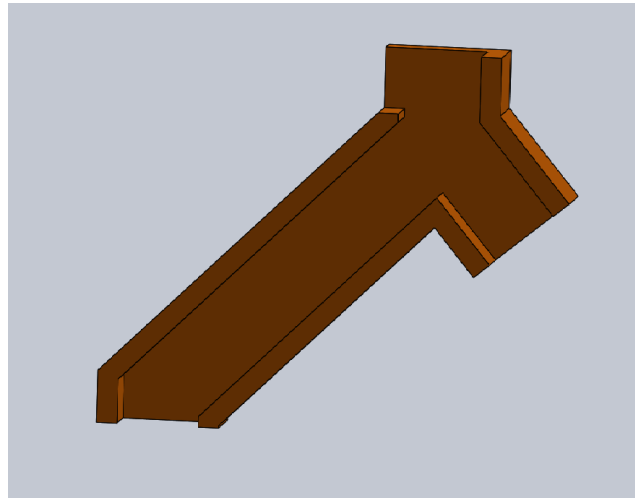


Figura 6.93 Perspectiva de la geometría común de las piezas M22.1 y M22.2, pieza M22

La corredera de la versión anterior ha sido sustituida por un sistema de posiciones predefinidas donde encajar el mástil, mediante una nueva pieza denominada M25. Estas posiciones están espaciadas entre ellas 10mm. La pieza M25 se une al resto del mástil mediante la pieza M26. Con este nuevo diseño se eliminan los posibles puntos de rotura del anterior sistema.

Para modelar esta pieza, en primer lugar, se realiza una extrusión de su sección transversal de 30mm. En su croquis pueden diferenciarse dos partes. La parte inferior es la que encaja en la pieza que sustituye a la guía de la corredera, la pieza B21. Este ajuste se realiza mediante unos salientes cilíndricos de diámetro 2.6mm. El procedimiento para crearlos ha sido construir en primer lugar el saliente central de una de las caras mediante la extrusión de su croquis. Seguidamente se ha realizado un patrón lineal para obtener los dos salientes restantes sobre esa cara. En esta operación se ha especificado la dirección 1 y la dirección 2 con la misma arista, sólo que una de ellas se ha invertido el sentido. De este modo se pueden crear instancias sobre la misma recta especificando el número de instancias en cada sentido. En este caso, son dos instancias separadas 10mm en las dos direcciones.

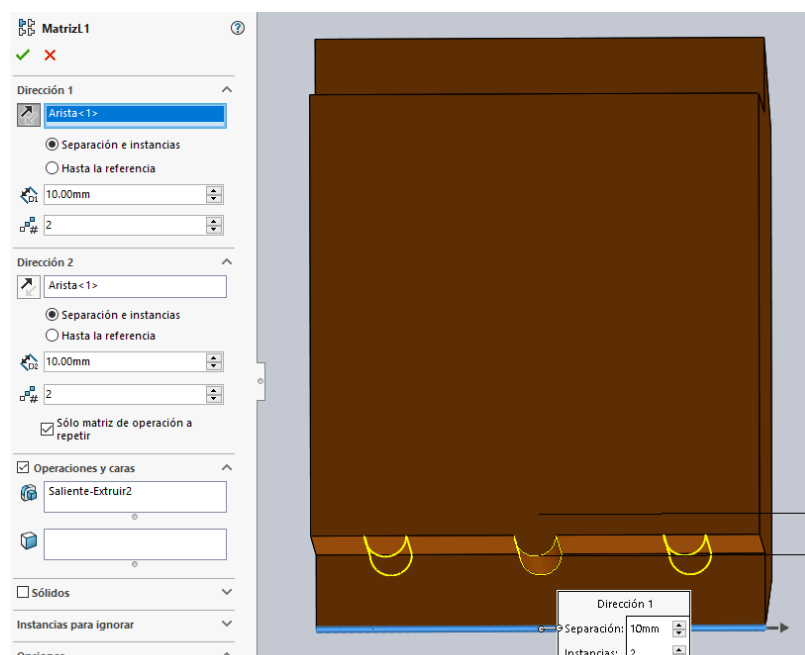


Figura 6.94 Operación matriz lineal. Nótese que se usa la misma arista para ambas direcciones.

Aunque es un modo complejo de realizar la operación, el hecho de disponer como referencia el saliente central evita el tener que recalcular la posición de los salientes en el caso de que se modifique el ancho de la pieza. Una vez creados los tres salientes de una cara, se crean los de la otra cara mediante una operación de simetría.

En la parte superior hay dos resaltes para asentar el mástil sobre la pieza B21 y conseguir mayor estabilidad.

La pieza se finaliza con la construcción de los dos carriles donde encaja la pieza M26.

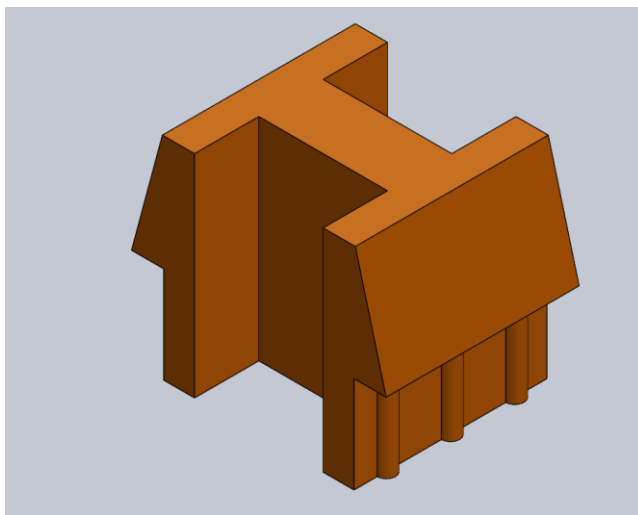


Figura 6.95 Perspectiva de la pieza M25.

La pieza M26 tiene como función crear una unión resistente entre la pieza M25 y las piezas M22.x. Está formada por dos espigas inferiores que encajan en los carriles de la pieza M25 y una espiga superior que encaja en el hueco formado por la unión de las piezas M22.1 y M22.2.

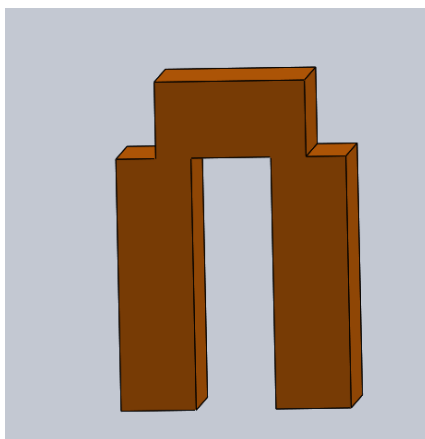


Figura 6.96 Perspectiva de la pieza M26.

6.3.1.3 Base

Este elemento sustituye a la guía de la corredera del primer diseño. Se ha diseñado de modo que se obtenga un mayor aprovechamiento del material, aunque esto ha supuesto tener que crear más piezas.

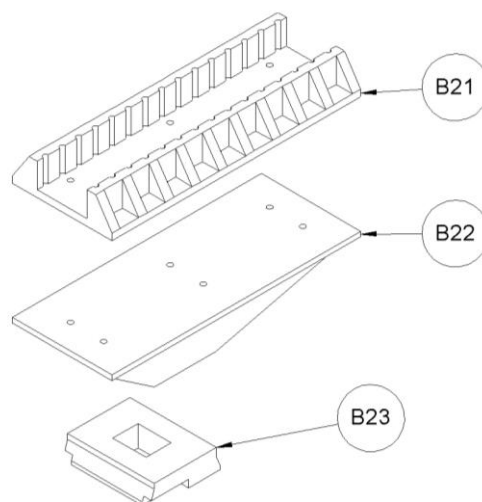


Figura 6.97 Despiece del elemento base.

La pieza donde encaja la pieza M25 es la pieza superior, denominada B21. En ella es donde están definidas hasta 13 posiciones, cada una de ellas separadas 10 mm, lo que permite tener un volumen de control de hasta 120 mm de longitud total. Para realizar esta pieza, en primer lugar, se modeló una placa rectangular de 150mm de longitud y 60mm de ancho, con un espesor de 4mm. Seguidamente se realizaron todas las operaciones para obtener uno de los laterales, realizando el otro por simetría.

Para construir el lateral, se comenzó creando la pared sobre la que van tallados los huecos que determinan las posiciones. Esta pared se realizó mediante una operación de extrusión lámina con un espesor de 5mm. Como el hueco interior entre paredes debe ser de 30mm, el croquis de esta operación se realizó a 15mm del plano de simetría, el alzado. El siguiente paso es construir los nervios que refuerzan esta pared, creados mediante la operación nervio, con un espesor de 5mm. El primer nervio se creó en uno de los extremos, con la opción de dar espesor a ambos lados seleccionada, por lo que el croquis del nervio se encuentra justo en su plano medio. Como los nervios de los extremos deben estar justo en el borde de la pieza, fue necesario crear dos planos a 2.5mm de los extremos de la pieza. Uno de ellos es el plano sobre el que se creó el croquis del nervio. El otro sirve como referencia para crear los demás nervios mediante un patrón lineal. En esta ocasión el patrón solo se especifica en una dirección, seleccionando la opción hasta referencia y desde el centro de gravedad. Por último, se indican el número de instancias a realizar, 10. De este modo, el nervio del extremo opuesto al realizado queda perfectamente alineado con el borde.

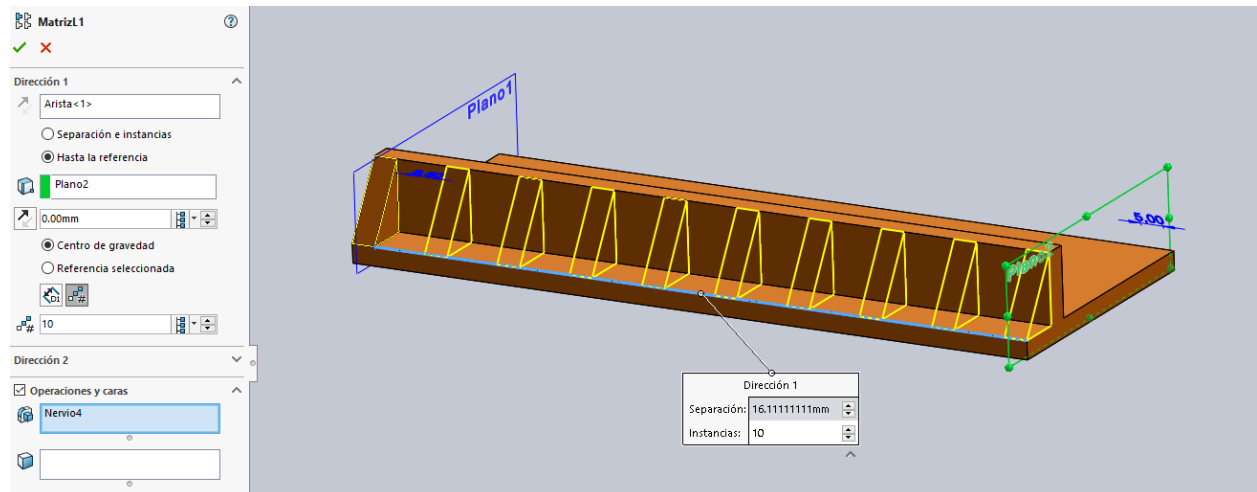


Figura 6.98 Operación matriz lineal para realizar los nervios. En la imagen puede verse el Plano 1 en azul, que es donde se realizó el croquis del primer nervio, y el Plano 2 en verde, que sirve como referencia para la matriz.

Por último, se realizan los huecos. La estrategia seguida para su construcción es la misma que en la pieza M25. En primer lugar, se construye el hueco central, esta vez con un diámetro de 3mm. Seguidamente se le realiza un patrón lineal para obtener el resto, con una separación de 10mm y 8 instancias por dirección, lo que da un total de 15 huecos que permiten obtener las 13 posiciones longitudinales.

Para finalizar la pieza se realiza una simetría a estas operaciones.

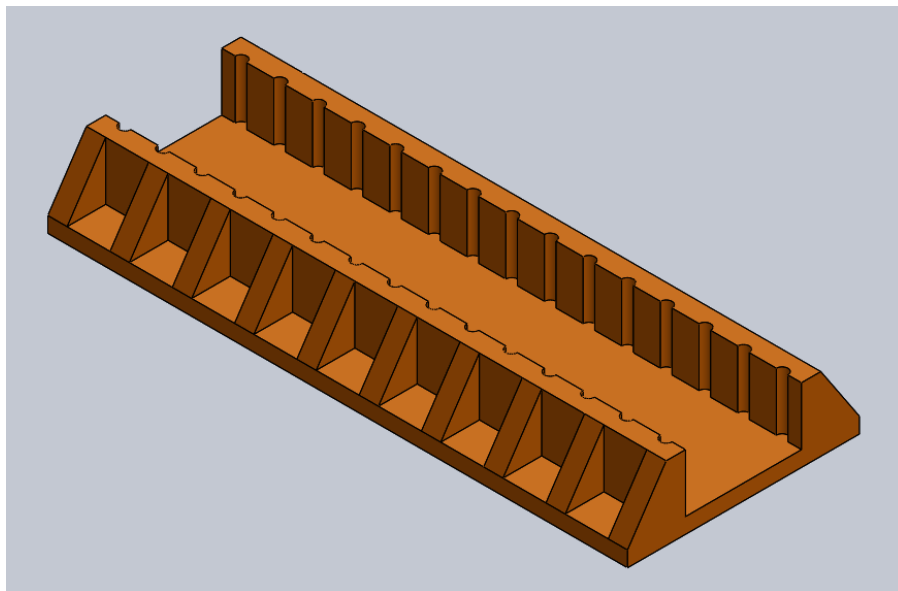


Figura 6.99 Perspectiva de la pieza B21.

La función de la pieza B22 es doble. Por un lado, sirve de refuerzo para la B21, y por el otro, es el nexo de unión entre la pieza B21 y la zapata del trípode. Debido a que el giro hacia la izquierda o derecha se realiza mediante el trípode se ha diseñado esta pieza de tal modo que el eje de giro del trípode coincida con el centro de la cara expuesta del cubo de calibración en la posición central.

El modelado de esta pieza comenzó por la construcción de una placa rectangular de 150mm de longitud y 60mm de ancho, con un espesor de 3mm. Seguidamente se modeló la base sobre la que se coloca la zapata, mediante un rectángulo con las dimensiones de la superficie superior de la zapata, 37mm de longitud y 52mm de ancho. Para realizar correctamente el giro, la zapata debe colocarse sobre el plano de simetría longitudinal y a 27 mm de la posición central. Este valor es la distancia desde la cara expuesta del cubo de calibración hasta el plano central de la base del mástil en la posición vertical, como puede verse en el Anexo A Versión 2 hoja 2. La placa está reforzada con nervios que llegan hasta la base de la zapata. Por este motivo se decidió extruir la base hasta una altura de 20mm. A estos nervios se le ha dado un espesor de 5mm.

El siguiente paso es la construcción de la espiga que sirve para unir esta pieza a la pieza que modela la zapata. A la espiga se le ha dado una altura menor que a la zapata porque la zapata real es hueca, por lo que se ha decidido dejar un pequeño hueco por si hubiera algún elemento del trípode que pudiese interferir con la pieza.

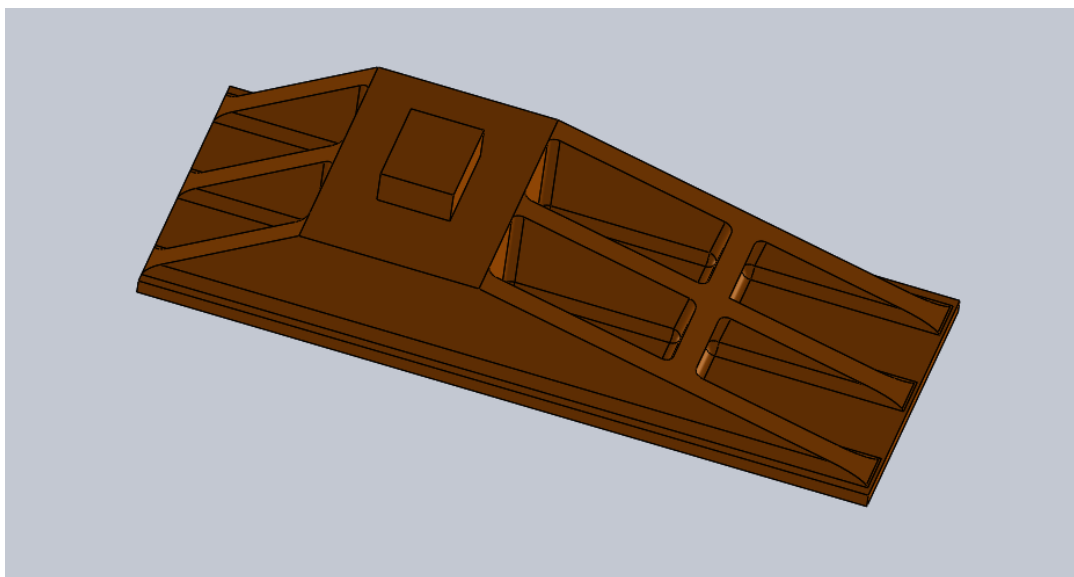


Figura 6.100 Perspectiva de la pieza B22.

Las piezas B21 y B22 no se podrían haber impreso como una sola sin usar soportes debido a su geometría, por esta razón se decidió hacerlas por separado. La geometría resultante en ambas piezas incorpora una ventaja de la que no disponen las demás piezas que ha sido necesario unir. Al estar en contacto por dos planos de gran superficie se ha podido realizar una unión atornillada. El principal motivo para usar este tipo de unión es que ambas piezas requieren un gran número de horas para su impresión, por lo que se consigue un significativo ahorro de tiempo en el caso de tener que sustituir alguna de ellas. Los tonillos usados en la unión son seis unidades M3x6 DIN916. La unión atornillada requiere modelar los taladros en las piezas B21 y B22. Estos taladros son de diámetro 3mm y se realizan mediante un patrón lineal.

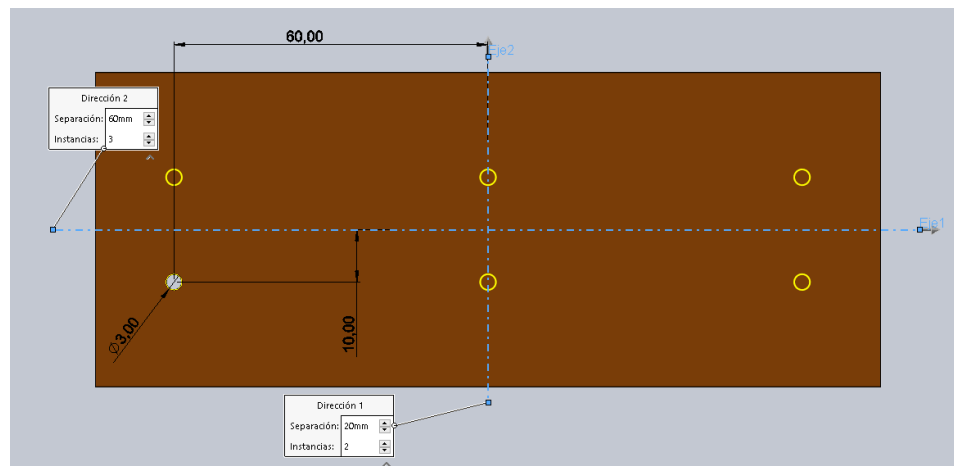


Figura 6.101 Patrón para realizar los taladros tanto para la pieza B21 como para la B22.

La zapata del trípode también ha sido realizada mediante impresión 3D poder incluirlo en el utillaje, de este modo no necesita incorporar piezas externas para su funcionamiento. La pieza que replica la zapata es la B23. Para modelarla primero ha sido necesario tomar las medidas de la original mediante un pie de rey. Al modelo de la zapata se le ha realizado un hueco para encajar la espiga de la pieza B22 y así poder unirlos.

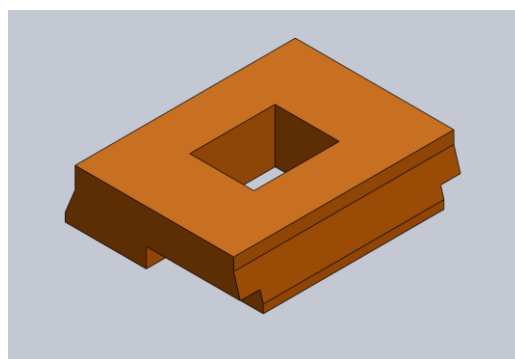


Figura 6.102 Perspectiva de la pieza B23.

6.3.2 Ensamblaje

Este ensamblaje se ha realizado de forma similar al de la primera versión. En esta ocasión se ha establecido como componente fijo la pieza B21.

La principal diferencia se encuentra en la pieza M22. Esta pieza se ha dividido en dos, la M22.1 y la M22.2. En la etapa de modelado se creó la geometría común para ambas piezas, indicando que se terminarían en el ensamblaje. Para ello, en primer lugar, se debe insertar la pieza M22 y colocar con sus correspondientes relaciones de posición. Una vez insertada, se le realiza una operación de simetría respecto al plano alzado. En las opciones de la operación, en el paso 2, se selecciona Crear versión simétrica y en el paso 3 se selecciona Crear nueva configuración derivada en archivos existentes. De esta forma, en un mismo archivo se encuentran las dos piezas guardadas en distintas configuraciones, una la configuración predeterminado, que será la pieza M22.2 y otra la configuración simétrica, la pieza M22.1.

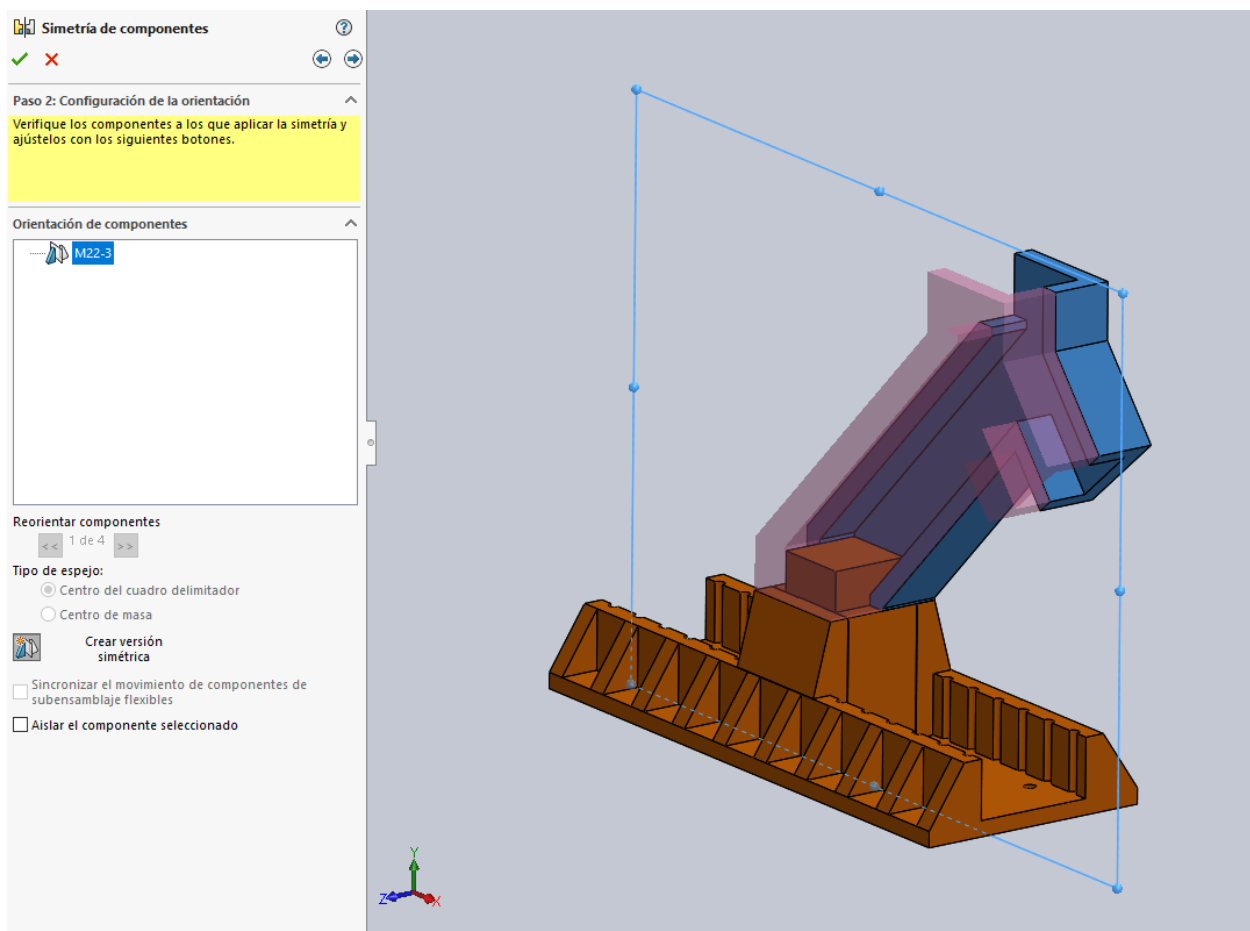


Figura 6.103 Operación simetría de componentes. En la parte superior derecha del cuadro de opciones pueden verse las flechas que permiten navegar entre los distintos pasos. En la imagen se encuentra en el Paso 2: configuración de la orientación, donde se ha seleccionado la opción Crear versión simétrica. En el Paso 3: Versión simétrica se selecciona la opción Crear configuración derivada en archivos existentes para evitar crear dos archivos de la misma pieza.

Para facilitar el montaje y aumentar la resistencia de su unión se han creado en ambas piezas unas espigas que encajan en su complementaria.

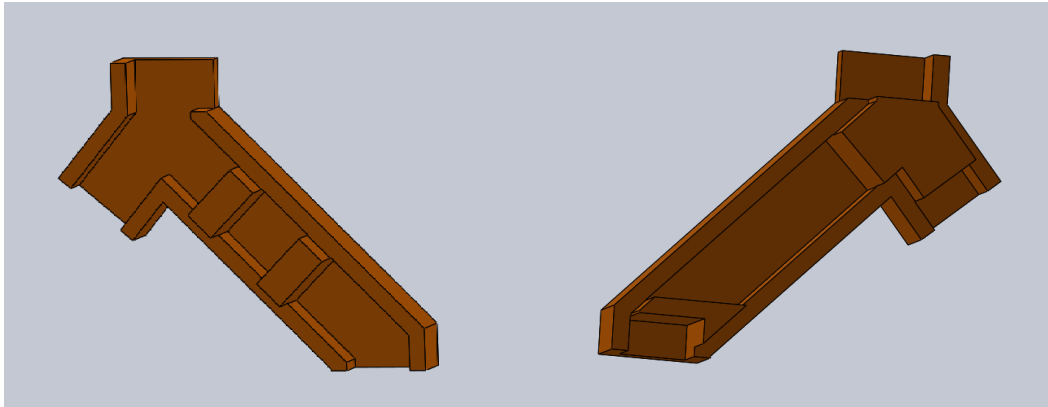


Figura 6.104 A la izquierda: Pieza M22.1. A la derecha: Pieza M22.2.

Otro aspecto importante a resaltar es el ensamblaje de las cuatro piezas C23. Esto se realiza mediante la operación patrón circular una vez que se ha colocado la primera. Para ello es necesario crear el eje alrededor del cual se genera el patrón. Este eje se puede obtener de la intersección de los planos Planta y Vista lateral de la pieza C21.

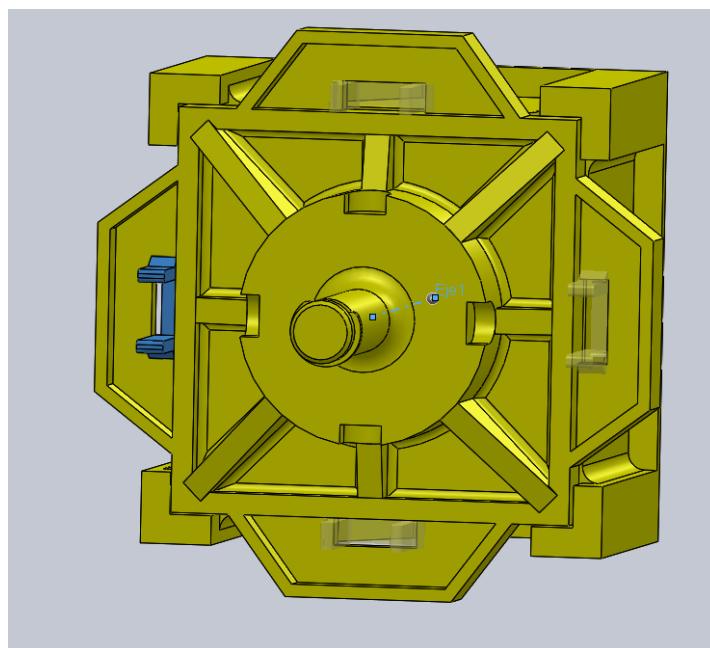


Figura 6.105 Operación Patrón Circular de componentes.

Una vez terminado el ensamblaje, se procede a realizar el análisis de interferencias, del que se obtiene la interferencia entre las piezas C24 y C22 como en la primera versión.

A continuación, se muestran unas perspectivas del ensamblaje terminado.

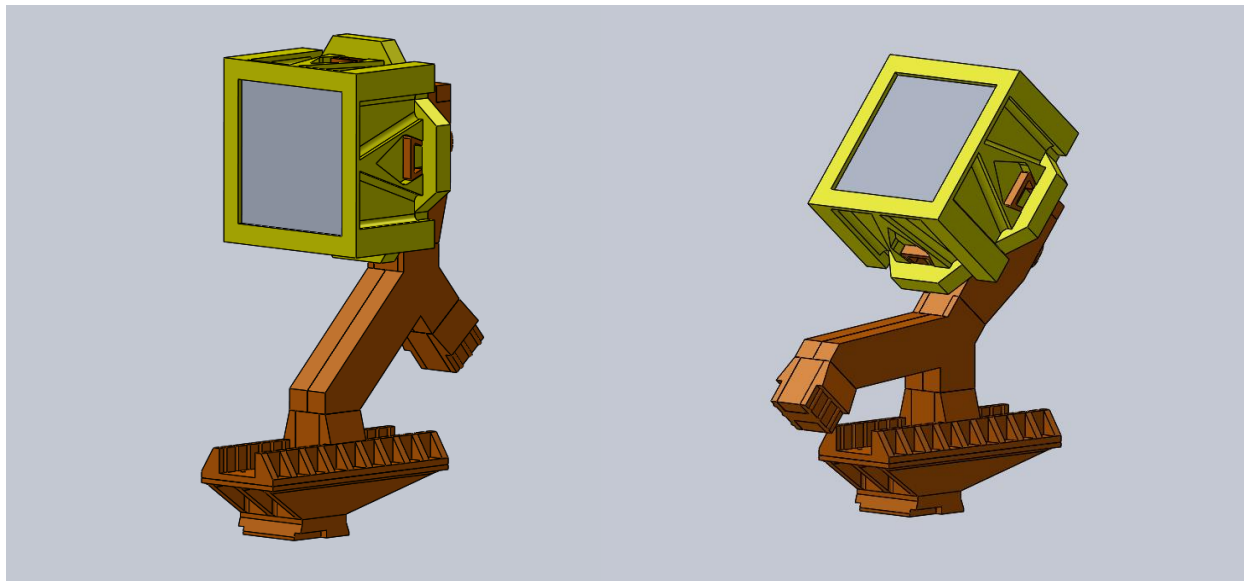


Figura 6.106 Perspectivas del utillaje en su versión 2. A la izquierda en posición vertical y a la derecha en posición inclinado.

6.3.3 Impresión

Durante el proceso de impresión se realizaron varias pruebas para determinar los mejores parámetros de impresión para cada pieza. Dado que durante la impresión de la primera versión no hubo problemas de adherencia, se decidió mantener la opción falda con dos líneas y se disminuyó la temperatura de la cama a 50°C. El patrón del relleno se mantiene también en forma de rejilla y se habilitan las retracciones.

6.3.3.1 Pieza C21.

Esta es una de las piezas más grandes del proyecto. En una primera configuración se decidió usar unos parámetros de impresión parecidos a los de la primera versión, solo modificando los necesarios para aumentar su resistencia. Como en la pieza predominan las paredes delgadas, se puede suponer que los parámetros que más influye en la resistencia son los relativos a la categoría perímetro, por lo que el valor del recuento de líneas de la pared y el número de capas superiores e inferiores se elevó a tres, quedando el grosor de la pared en 0.8mm y, como la altura de capa es de 0.25mm, el grosor de la parte superior y de la inferior en 0.6mm. Los demás parámetros, reflejados en la tabla, permanecen intactos respecto a la primera versión.

Tabla 6.1 Parámetros de impresión de C21, primera prueba.

Porcentaje relleno	20%
Temperatura de impresión	200°C
Velocidad de impresión	60mm/s
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

Con estos parámetros el tiempo de impresión estimado por el programa es de 8 horas 4 minutos. Para intentar disminuir este tiempo se decidió aumentar la velocidad de impresión a 80mm/s, lo que reduce el tiempo a 6 horas 57 minutos. Al aumentar la velocidad podría darse el caso de que el material no posea suficiente fluidez, provocando defectos por falta de aporte de material. Para evitar este fallo se decidió aumentar la temperatura de impresión a 205°C.

Durante el proceso de impresión apareció el fallo anteriormente citado en la pieza CR11.

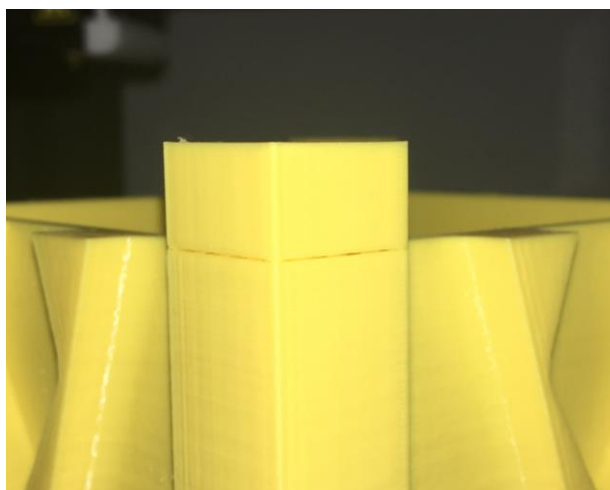


Figura 6.107 Fallo de falta de adherencia entre capas, presentr en las cuatro esquinas.

Para intentar eliminar este fallo se rediseñó la pieza incluyendo unos radios de acuerdo entre los resaltes y el resto de la pieza, de forma que la siguiente capa tuviera más superficie sobre la que apoyar. Sin embargo, esto no dio resultado, volviendo a aparecer las mismas grietas.

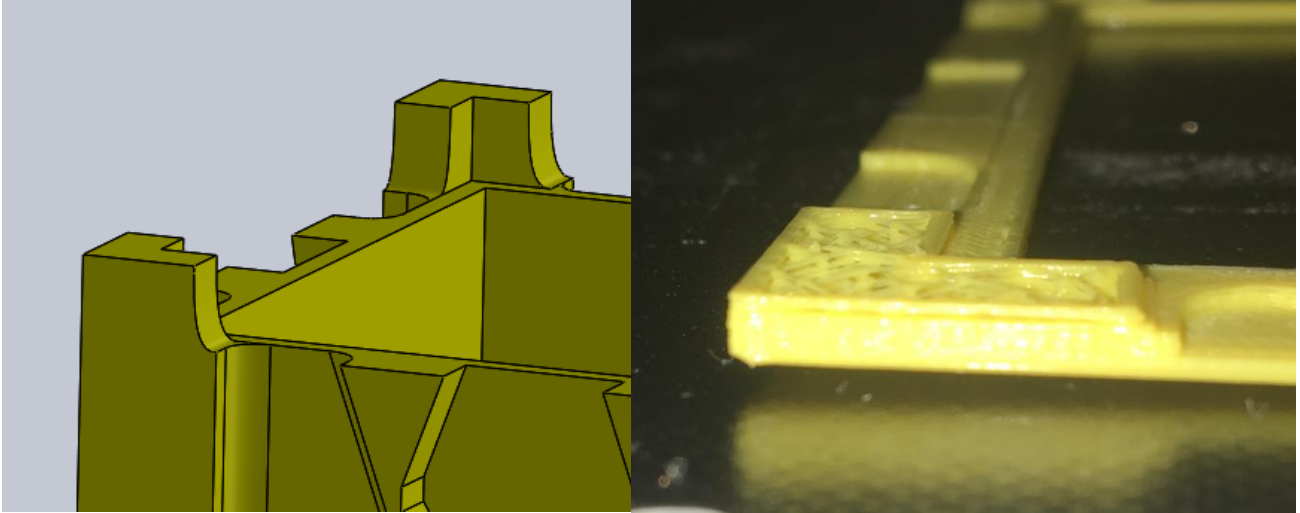


Figura 6.108 A la izquierda: nuevo diseño con los radios de acuerdo. A la derecha: grietas en las cuatro esquinas.

En otro intento de solucionarlo, se decidió incluir unos nervios inclinados de modo que se pudiera aumentar el radio de acuerdo y la superficie de contacto entre la base del resalte y la superficie superior de la pieza. Nuevamente, esto tampoco dio resultado, volviendo a aparecer las grietas.

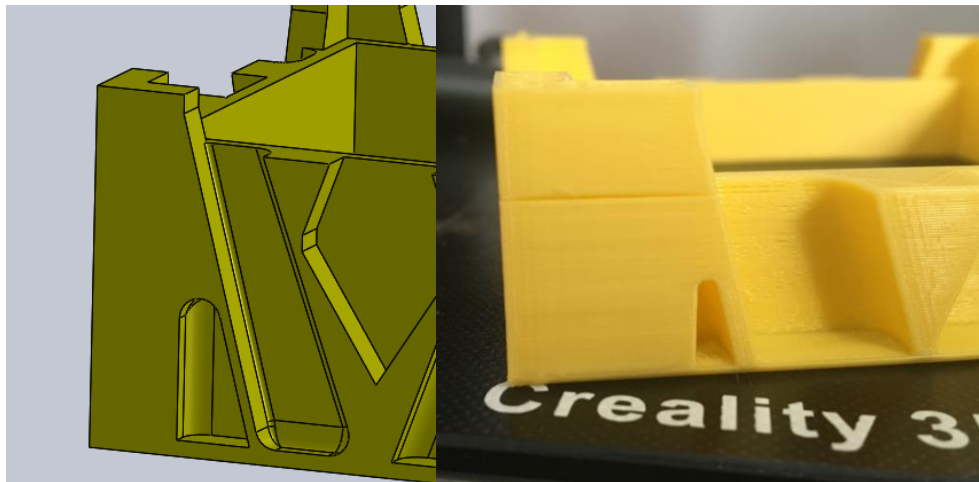


Figura 6.109 A la izquierda: nuevo diseño con los nervios para suavizar la transición hacia el resalte. A la derecha: grietas en las cuatro esquinas.

Como modificando la geometría no se obtuvieron mejores resultados se decidió modificar los parámetros de impresión. Principalmente se disminuyó la altura de capa a 0.2mm. Otra modificación fue disminuir la velocidad de impresión a 70mm/s ya que la anterior velocidad era excesiva y provocaba rugosidad en las paredes por la pérdida de precisión. Estos cambios suponen un aumento del tiempo estimado de impresión a 9 horas 4 minutos y un consumo de material de 87 gramos. El tiempo real de impresión fue de 10 horas 2 minutos. El resultado fue una disminución de la anchura de las grietas, pero no se logró eliminarlas.

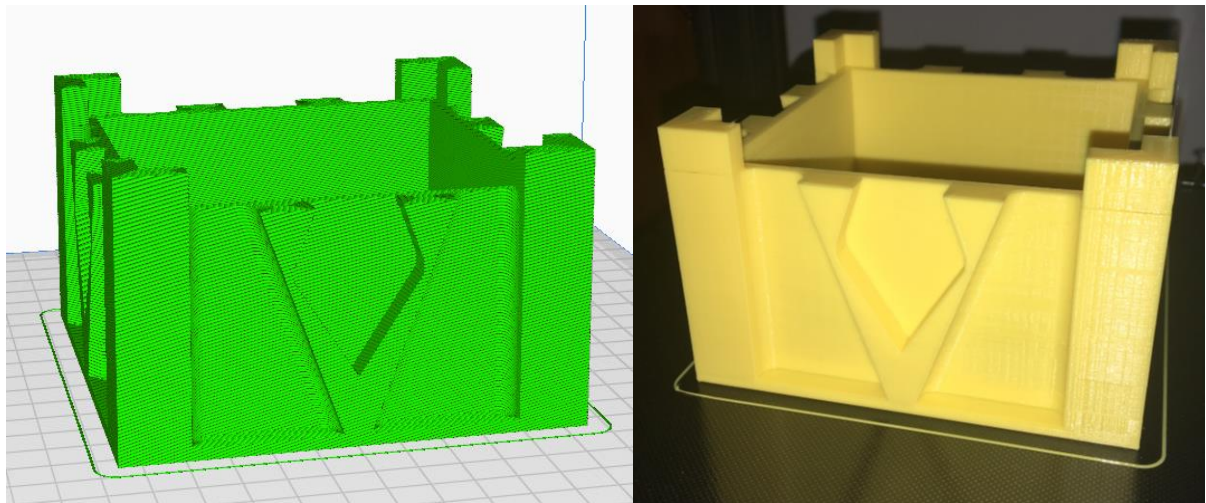


Figura 6.110 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

Sin embargo, observando el montaje de la carcasa se puede apreciar, incluso estando cargado el modelo del cubo, una separación entre la pieza C22 y los resaltes de la pieza C21, por lo que se puede suponer que las pinzas son suficientes para mantener la unión y que los resaltes apenas están cargados.

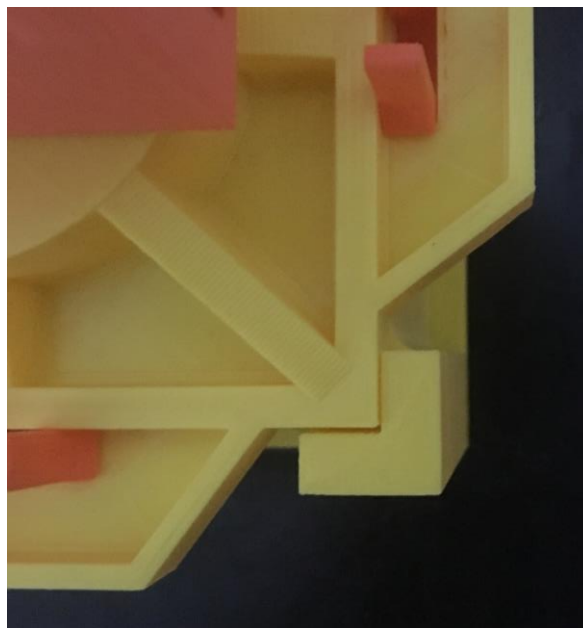


Figura 6.111 Hueco entre la pieza C21 y la C22.

Finalmente, los parámetros usados fueron:

Tabla 6.2 Parámetros de impresión de la pieza C21.

Altura de capa	0.2mm
Recuento de líneas de pared	3
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	20%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

Para las siguientes piezas se mantiene la temperatura de impresión a 205°C y la velocidad de impresión a 70mm/s

6.3.3.2 Pieza C22.

El elemento más débil de esta pieza es el eje. Para reforzar este elemento se ha decidido elevar el número de líneas de pared a cuatro, por lo que el grosor de la pared es de 1.2mm. Se usaron los siguientes parámetros de impresión:

Tabla 6.3 Parámetros de impresión de la pieza C22.

Altura de capa	0.25mm
Recuento de líneas de pared	4
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	20%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

El tiempo estimado de esta impresión fue de 6 horas y 13 minutos y un consumo de material de 83 gramos. El tiempo real de impresión es de 6 horas 28 minutos.

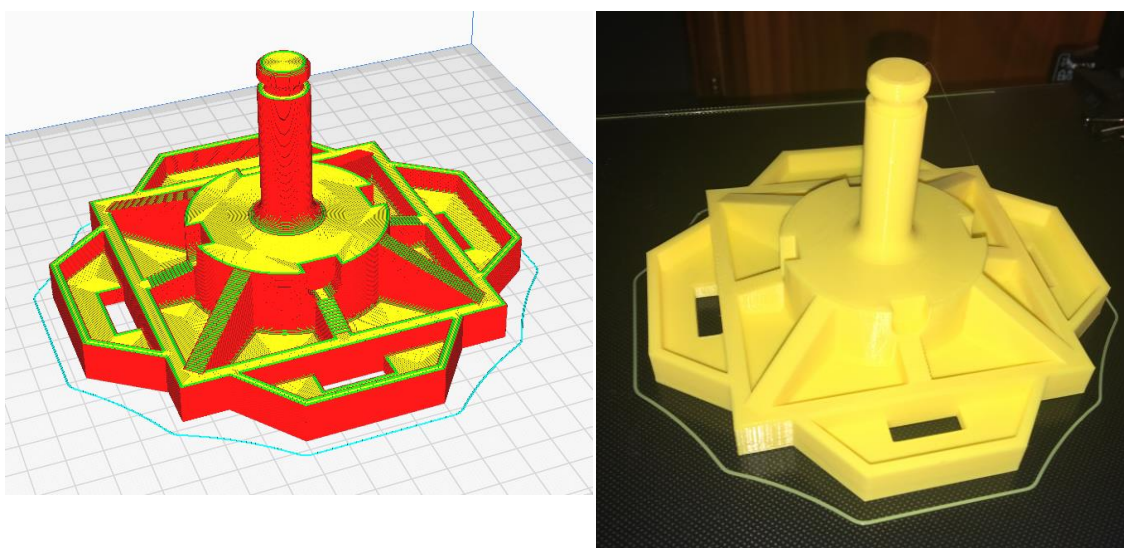


Figura 6.112 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.3.3 Pieza C23

Esta pieza debe ser sometida a flexión para su colocación. Por ese motivo se usaron unos parámetros que mejoraran la unión entre las capas y reforzaran el perímetro de la pieza.

Tabla 6.4 Parámetros de impresión de la pieza C23.

Altura de capa	0.2mm
Recuento de líneas de pared	4
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	30%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

El tiempo estimado de una pieza es de 16 minutos y el real de 18 minutos. La cantidad de material empleada fue de 3 gramos.

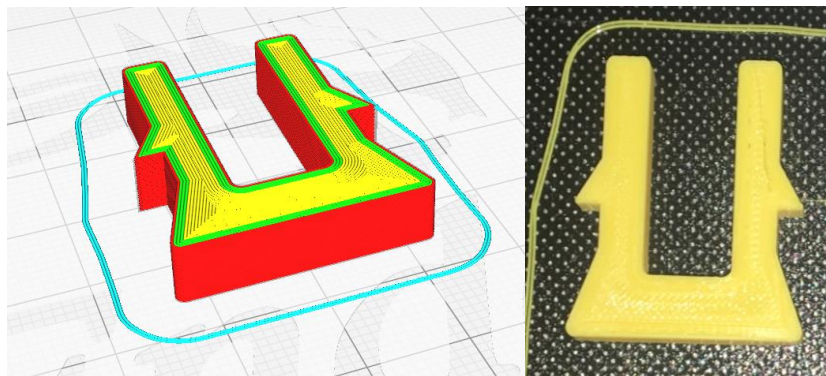


Figura 6.113 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

Una vez impresa esta pieza se pudo comprobar que contaba con demasiada rigidez como para poder colocarla con los dedos. Un posterior análisis mediante elementos finitos corroboró esta excesiva rigidez, ya que, bajo una fuerza de 10 N, apenas se lograba una retracción del resalte de medio milímetro, cuando el saliente es de 3mm.

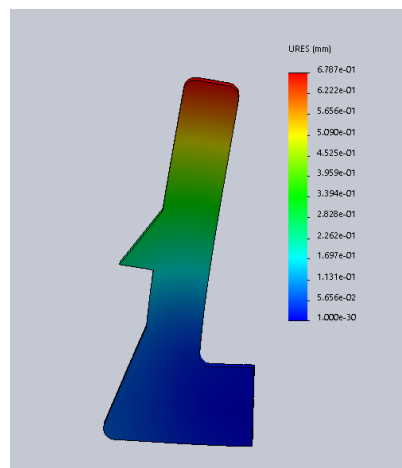


Figura 6.114 Resultado de las deformaciones en el análisis por elementos finitos.

Aunque se podrían haber modificado los parámetros de impresión para reducir la rigidez, sería a costa de disminuir la resistencia, por lo que se decidió rediseñar la pieza.

El estudio mediante elementos finitos a un nuevo diseño de esta pieza, de menor espesor, dio como resultado una retracción suficiente bajo la misma carga. Aunque, como se ha comentado anteriormente, los modelos usados para los análisis mediante elementos finitos son sustancialmente diferentes a la pieza real, el hecho de poder comparar los resultados con los del estudio anterior, donde si se pudieron comprobar sus resultados empíricamente, dotan a este análisis de cierta veracidad.

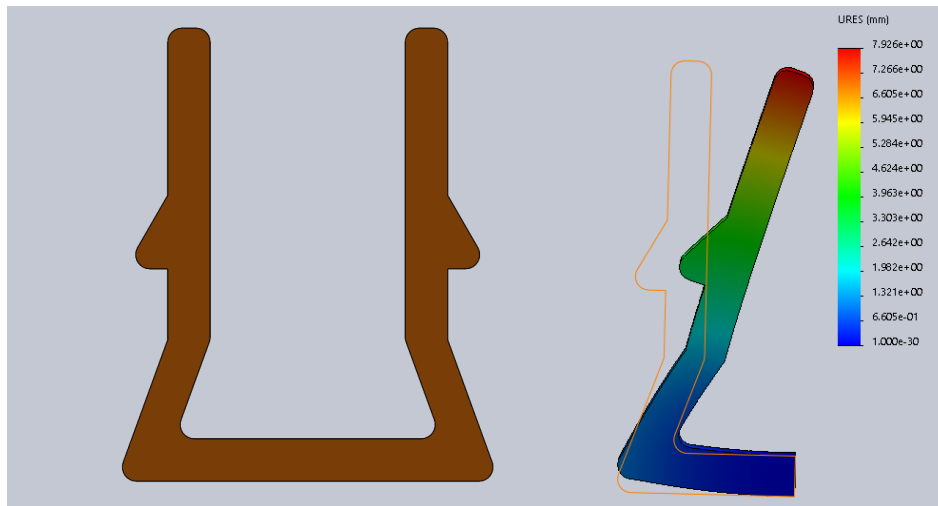


Figura 6.115 A la derecha: nuevo diseño de la pieza C23. A la derecha: análisis del nuevo diseño bajo las mismas condiciones que el análisis anterior. La escala de deformación en la representación es de 1, por lo que se puede comparar directamente con su forma indeformada.

Para la impresión del nuevo diseño de la pieza se usaron los mismos parámetros que la anterior, obteniéndose un tiempo estimado de 14 minutos y un tiempo real de 16 minutos por pieza. El consumo de material fue de 2 gramos.

Esta nueva pieza si cuenta con la flexibilidad suficiente para ser colocada sin requerir un esfuerzo excesivo.

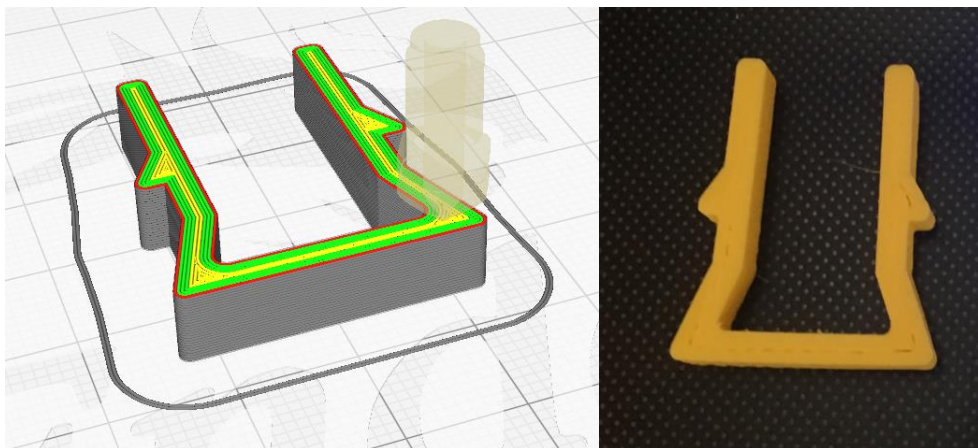


Figura 6.116 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.3.4 Pieza C24

Debido al tamaño de esta pieza y a la deformación a la que es sometida es su colocación, se decidió imprimirla completamente sólida, por lo que fue necesario aumentar el número de líneas de pared a cinco. Para aumentar la adherencia entre las capas se estableció la altura de capa en 0.15mm. En este caso, no aplica ni el número de capas superiores e inferiores ni el relleno.

Tabla 6.5 Parámetros de impresión de la pieza C24

Altura de capa	0.15mm
Recuento de líneas de pared	5
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

El tiempo estimado de una pieza es de 2 minutos y el real de 3 minutos. La cantidad de material empleada es menos de un gramo.



Figura 6.117 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.3.5 Pieza C25

Esta pieza no está sometida a ningún esfuerzo, por lo que se usaron unos parámetros de impresión destinados únicamente a que la pieza posea un buen acabado.

Tabla 6.6 Parámetros de impresión de la pieza C25.

Altura de capa	0.25mm
Recuento de líneas de pared	2
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	15%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

El tiempo estimado de una pieza es de 6 minutos y el real de 8 minutos. La cantidad de material empleada fue de un gramo.

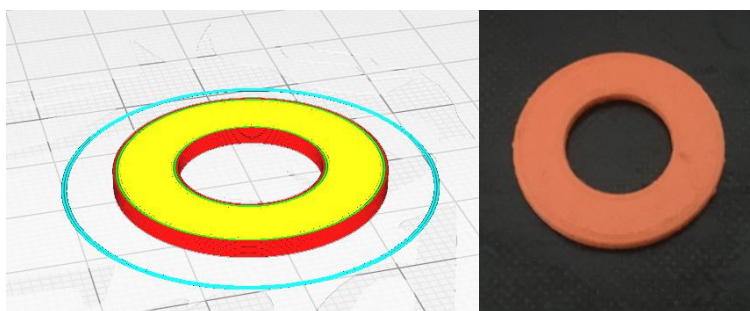


Figura 6.118 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.3.6 Pieza M21

Esta es una pieza de gran volumen donde además se encuentra el agujero del eje, por lo que el relleno será el parámetro más decisivo para su resistencia. Por este motivo, se reduce ha establecido dos líneas para construir la pared. En principio, se decidió probar con una altura de capa de 0.25mm, sin embargo, esta altura provocaba unos “escalones” en el plano inclinado muy acusados.

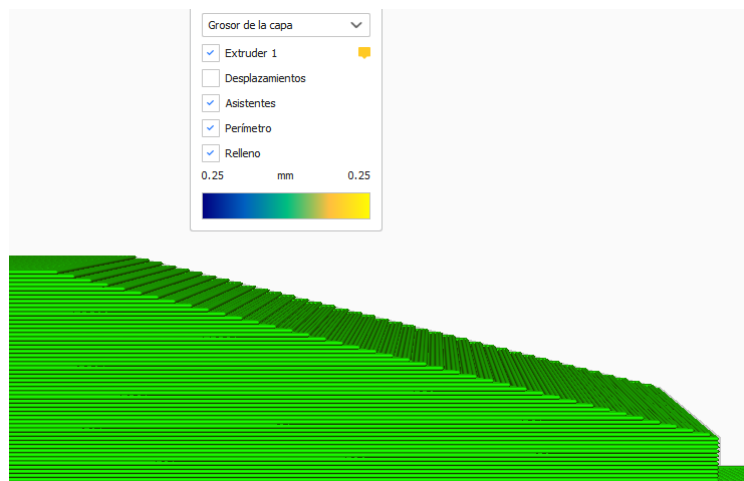


Figura 6.119 Detalle de los “escalones” producidos por la transición entre capas con altura 0.25mm

Para suavizar esta zona se decidió usar las capas de adaptación y disminuir la altura de capa a 0.15mm. Esto produjo un incremento del tiempo estimado de impresión, que pasó de 2 horas 31 minutos a 3 horas 41 minutos.

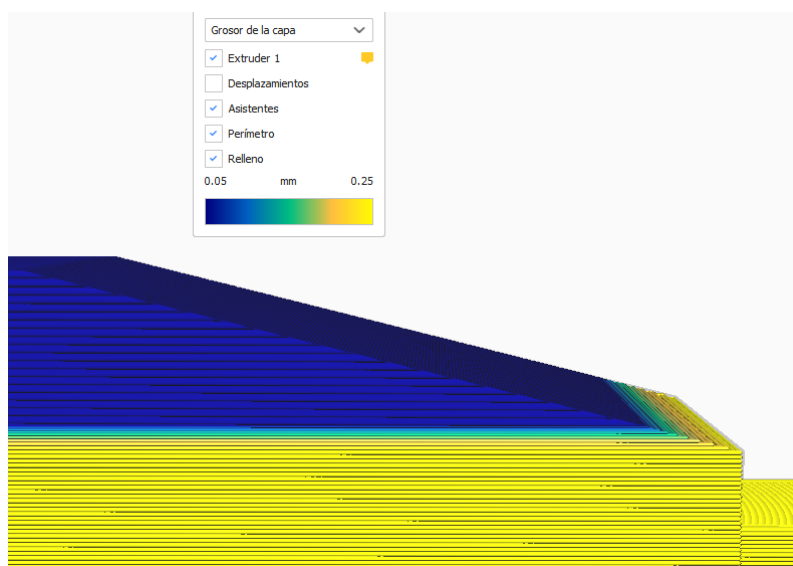


Figura 6.120 Detalle de los “escalones” suavizados.

Tabla 6.7 Parámetros de impresión de la pieza M21.

Altura de capa	0.15mm
Recuento de líneas de pared	2
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	20%
Usar capas de adaptación	Si
Generar soportes	No

Finalmente se obtuvo un tiempo real de 3 horas 57 minutos y un consumo de material de 43 gramos.

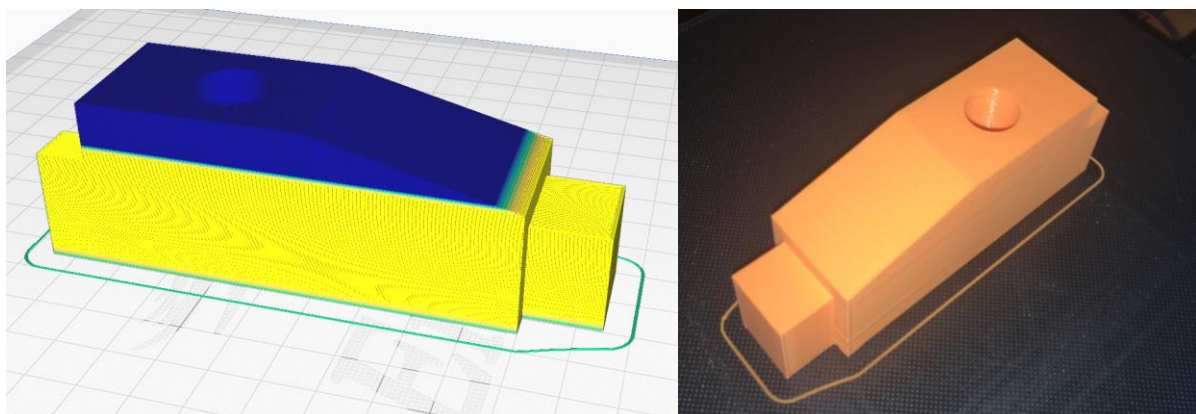


Figura 6.121 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.3.7 Piezas M22.1 y M22.2

Estas piezas están sometidas a esfuerzo de flexión. Por este motivo se ha reforzado su perímetro añadiendo cuatro líneas. Ambas piezas están impresas con los mismos parámetros.

Tabla 6.8 Parámetros de impresión de las piezas M22.1 y M22.2.

Altura de capa	0.25mm
Recuento de líneas de pared	4
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	20%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

El tiempo estimado de impresión de la pieza M22.1 es de 2 horas 13 minutos, con un peso de 34 gramos.

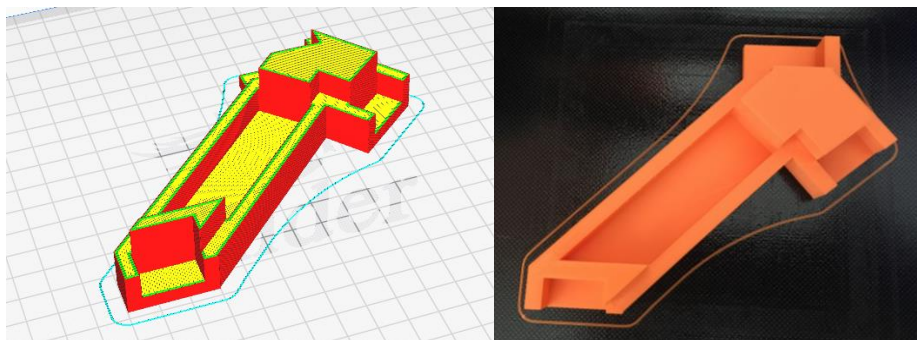


Figura 6.122 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

El tiempo de impresión estimado de la pieza M22.2 es de 2 horas 29 minutos, con un peso de 27 gramos.

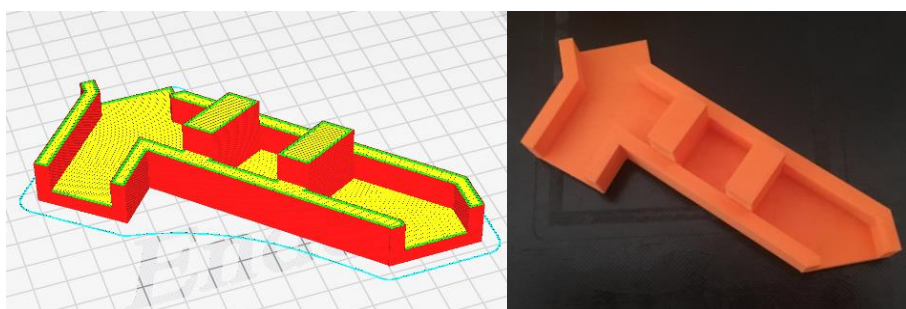


Figura 6.123 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

Finalmente, el tiempo real de impresión de la pieza M22.1 fue de 2 horas 26 minutos y el de la pieza M22.2 de 2 horas 38 minutos.

6.3.3.8 Pieza M23

Esta es una pieza móvil que debe ser manipulada para el funcionamiento del utillaje. Además, se trata de una pieza pequeña. Por estos motivos, se ha decidido usar unos parámetros de impresión que confieran una resistencia considerable, ya que, aunque se eleve el tiempo de impresión, solo es por unos minutos. Para exponer este hecho, se va a realizar la comparación entre los parámetros que más se han repetido para la impresión de las piezas del proyecto y los parámetros usados en esta pieza.

Tabla 6.9 Parámetros de impresión de prueba.

Altura de capa	0.25mm
Recuento de líneas de pared	3
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	20%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

Usando estos parámetros habituales se obtiene un tiempo teórico de 8 minutos, con un consumo de material de 1 gramo.

Tabla 6.10 Parámetros de impresión de la pieza M23.

Altura de capa	0.25mm
Recuento de líneas de pared	4
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	50%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

Con los parámetros escogidos para esta pieza se obtiene un tiempo teórico de 9 minutos y el mismo consumo de material. Finalmente, el tiempo real de impresión fue de 13 minutos.

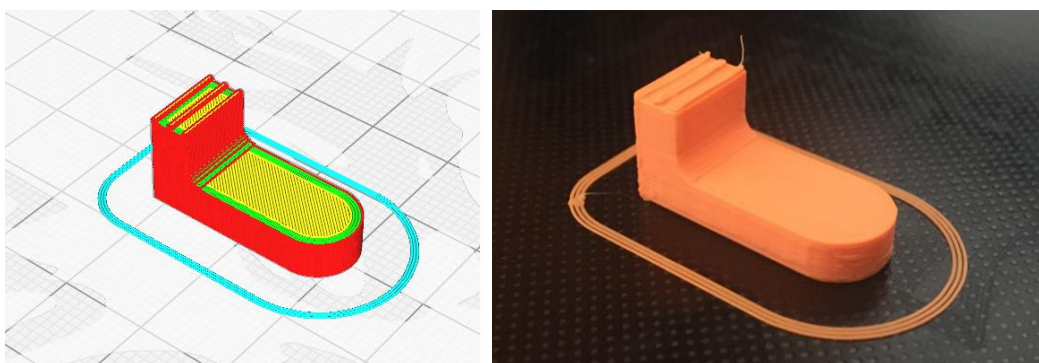


Figura 6.124 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.3.9 Pieza M24

Nuevamente se trata de una pieza pequeña, por lo que el tiempo de impresión no tendrá grandes variaciones al modificar los parámetros de impresión, así que se usaron los parámetros de impresión de las piezas M22, aunque esta pieza no esté sometida a esfuerzo alguno.

Tabla 6.11 Parámetros de impresión de la pieza M24.

Altura de capa	0.25mm
Recuento de líneas de pared	4
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	20%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

El tiempo teórico de impresión es de 25 minutos y el consumo de material de 4 gramos. El tiempo real de impresión fue de 28 minutos.

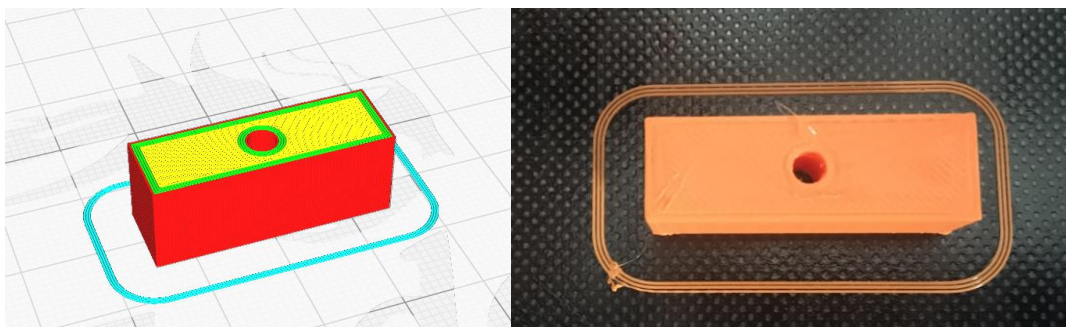


Figura 6.125 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.3.10 Pieza M25

En esta pieza se ha decidido construir los resaltes completamente rellenos. Para ello ha sido necesario aumentar el número de líneas de pared a cinco.

Tabla 6.12 Parámetros de impresión de la pieza M25.

Altura de capa	0.25mm
Recuento de líneas de pared	5
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	20%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

El tiempo estimado de una pieza es de 57 minutos y el real de 1 hora y 2 minutos. La cantidad de material empleada fue de 10 gramos.

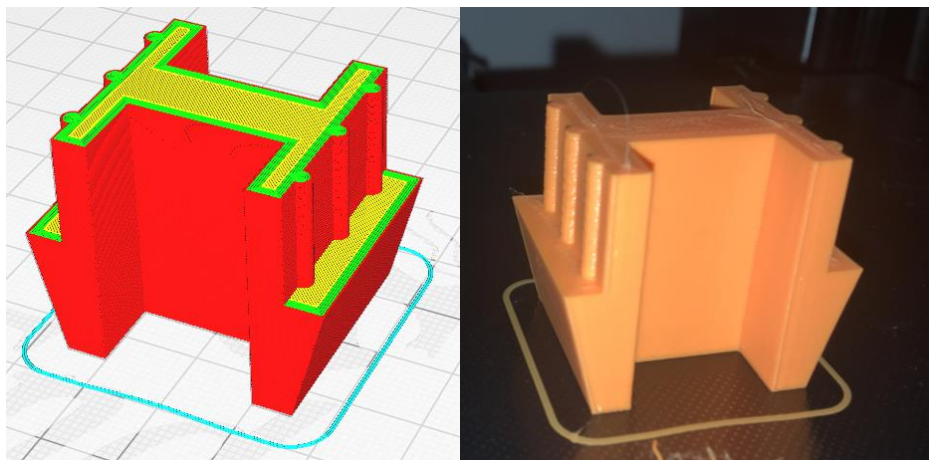


Figura 6.126 A la izquierda: modelo laminado de la pieza, nótese el detalle de los resaltes en líneas verdes, que indica que están realizados por líneas de perímetro. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.3.11 Pieza M26

Esta pieza debe imprimirse priorizando la resistencia ya que en esa zona es donde se producen las mayores tensiones. Por ello, se ha aumentado la densidad del relleno al 30% y se han usado cuatro líneas de pared.

Tabla 6.13 Parámetros de impresión de la pieza M26.

Altura de capa	0.25mm
Recuento de líneas de pared	4
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	30%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

El tiempo estimado de una pieza es de 50 minutos y el real de 53 minutos. La cantidad de material empleada fue de 8 gramos.

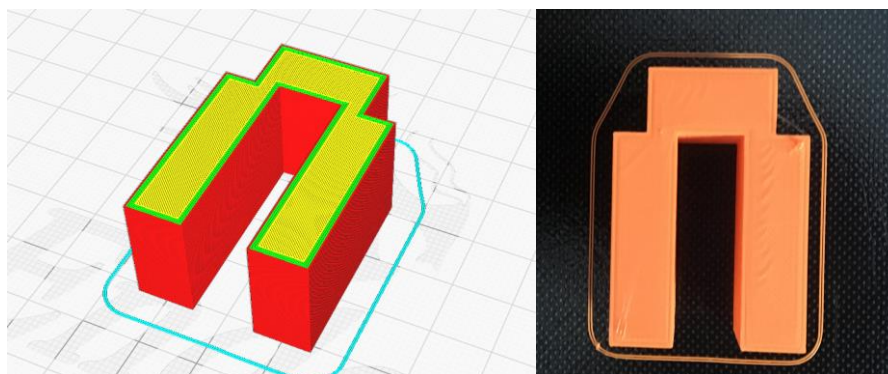


Figura 6.127 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.3.12 Pieza B21

Esta pieza es propensa a presentar el mismo fallo que la pieza C21, así que se ha usado la misma altura de capa. Está constituida por paredes delgadas tanto verticales como horizontales, así que su resistencia dependerá fundamentalmente de dos parámetros, el recuento de líneas de pared y el número de capas superiores e inferiores.

Tabla 6.14 Parámetros de impresión de la pieza B21.

Altura de capa	0.2mm
Recuento de líneas de pared	4
Capas superiores/inferiores	4
Porcentaje relleno	20%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

Debido al tamaño de la pieza se decidió hacer una prueba de impresión con una versión reducida de la misma. Como era de esperar, se produjeron las grietas entre la base y las capas superiores. Para evaluar la importancia de estas grietas se realizó un ensayo a la pieza. Se sometió a tracción en la dirección perpendicular de las grietas hasta producir la rotura de la pieza. Analizando los resultados, puede comprobarse que la grieta no se propaga hasta el final de la pieza, sino que se parte antes por la base, por lo que se puede suponer que la grietas no afectan de forma considerable a la resistencia de la pieza. Sin embargo, esta pieza será modificada para intentar eliminar las grietas por completo, por lo que no fue impresa en esta versión.

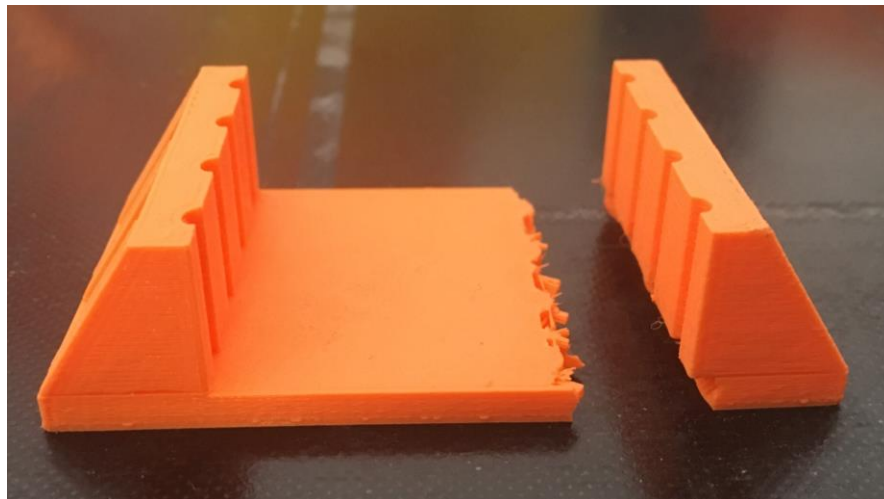


Figura 6.128 En la figura pueden verse las grietas entre las paredes verticales y el plano horizontal. Sin embargo, la rotura se ha producido por la base de la pieza, no por la grieta.

6.3.3.13 Pieza B22

La constitución de esta pieza es similar a la B21, a diferencia de que no presenta la geometría propensa a la aparición de las grietas. Por ese motivo se usarán los mismos parámetros que la pieza B21 de recuento de líneas de pares y de capas superiores e inferiores. Al igual que la pieza M21, esta también cuenta con planos inclinados, por lo que se usará la opción de usar capas de adaptación para suavizar esos planos. Para evitar que aumente considerablemente el tiempo de impresión, se limitará el intervalo de variación de la altura de capa en 0.05mm, por defecto este valor es 0.1mm. Esto se hace mediante una opción perteneciente al perfil expert del programa denominada Variación máxima de las capas de adaptación. Finalmente se estableció la altura de capa en 0.2mm, así que el menor grosor es de 0.15mm y el mayor de 0.25mm.

Tabla 6.15 Parámetros de impresión de la pieza B22.

Altura de capa	0.2mm
Recuento de líneas de pared	4
Capas superiores/inferiores	4
Porcentaje relleno	20%
Usar capas de adaptación	Si
Generar soportes	No

El tiempo estimado de una pieza es de 4 horas 41 minutos y el real de 4 horas 50 minutos. La cantidad de material empleada fue de 50 gramos.

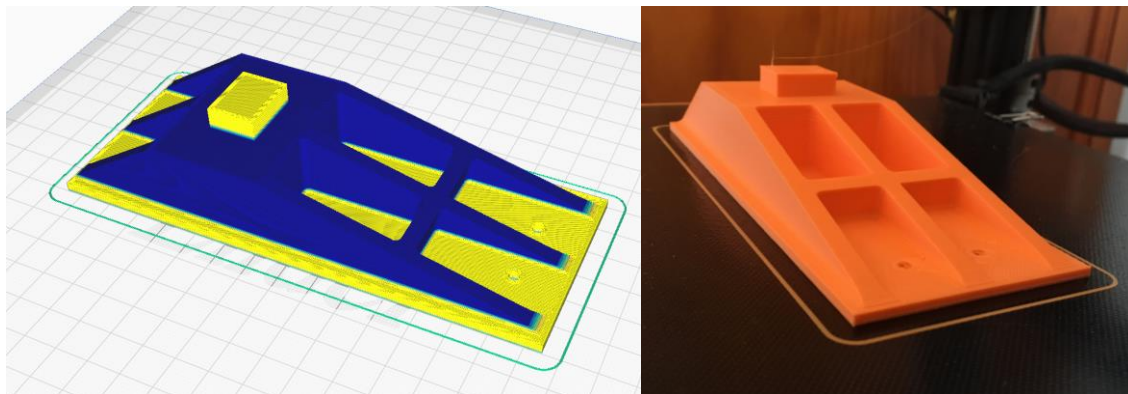


Figura 6.129 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.3.14 Pieza B23

Esta es una pieza relativamente pequeña con un volumen elevado, por lo que, para elevar su resistencia, se ha decidido aumentar la densidad de relleno hasta el 35%.

Tabla 6.16 Parámetros de impresión de la pieza B23.

Altura de capa	0.25mm
Recuento de líneas de pared	3
Capas superiores/inferiores	3
Porcentaje relleno	35%
Usar capas de adaptación	No
Generar soportes	No

El tiempo estimado de una pieza es de 56 minutos y el real de 1 horas 2 minutos. La cantidad de material empleada fue de 14 gramos.

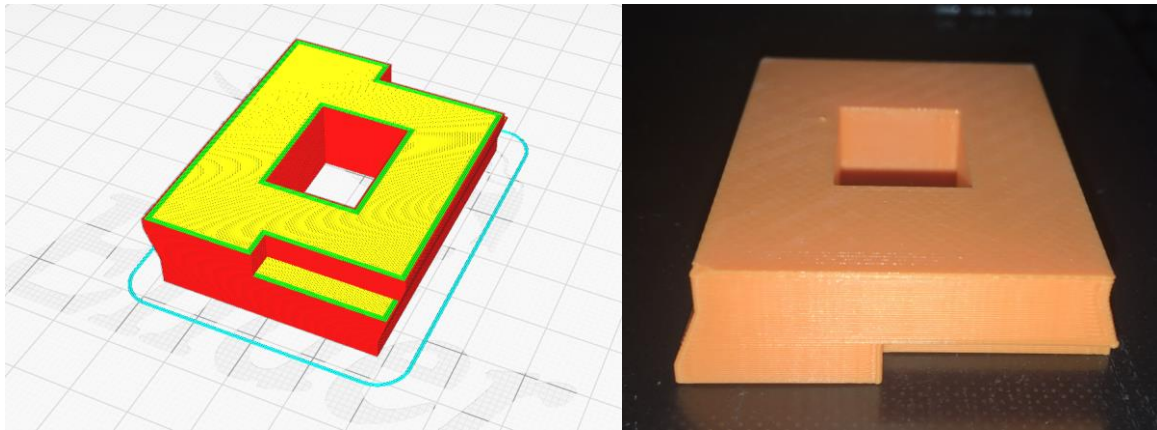


Figura 6.130 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.3.4 Montaje

Una vez impresas todas las piezas, se procedió a montar el utillaje.

Para unir las piezas del mástil se usó un pegamento bicomponente sin disolventes, ya que el PLA es soluble en disolventes orgánicos como la acetona.

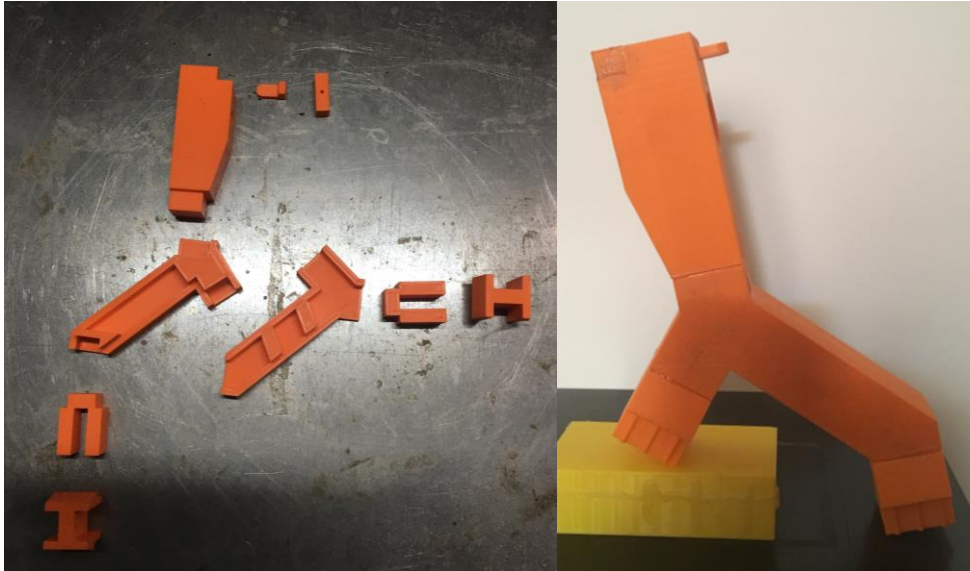


Figura 6.131 A la izquierda: todas las piezas que componen el mástil. A la derecha: mástil ensamblado.

Para colocar el resorte se han usado dos varillas de 3mm de diámetro.



Figura 6.132 Detalle del resorte.

6.3.5 Ensayo

Terminado el utillaje, se realizaron las primeras pruebas con el modelo del cubo para comprobar que el utillaje contaba con la suficiente resistencia y estabilidad.

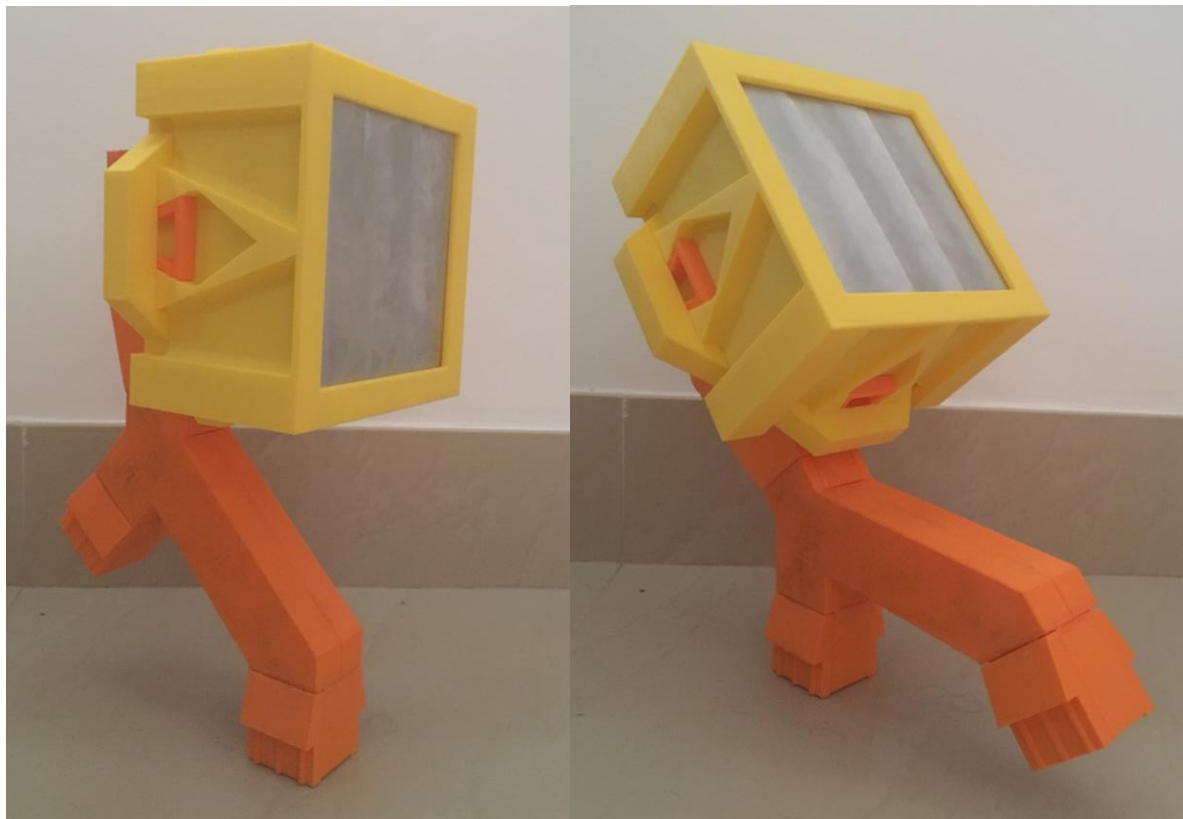


Figura 6.133 A la izquierda: posición vertical. A la derecha: posición inclinado. Puede verse que en ambas posiciones el utillaje se encuentra perfectamente equilibrado.

Superada esta prueba el utillaje estaría listo para realizar la prueba de calibración en el taller. Sin embargo, durante el proceso de generación de planos se pudo apreciar un error de diseño. Debido a la condición Cond2, el centro de la superficie expuesta del cubo de calibración no permanecía inmóvil al realizar el cambio de posición entre vertical e inclinado. En la posición inclinada el centro se retrasaba 6.54mm, lo que puede suponer un error en la calibración.

6.3.6 Mejoras en el diseño

- Modificar el mástil. La condición Cond2 debe ser sustituida por Cond3: la distancia horizontal entre el centro de la superficie expuesta y el centro de la pieza M25 debe permanecer constante al conmutar de la posición vertical a la posición inclinada.
- Reducir el juego de las piezas del mástil para lograr una mayor precisión durante el montaje.
- Modificar la pieza B21 para eliminar las grietas.

6.4 Versión 3

En esta versión se corregirán los errores de la anterior y se preparará el utillaje para su primera prueba de funcionamiento.

6.4.1 Modelado

6.4.1.1 Mástil

Para poder cumplir la condición Cond3 es necesario modificar el diseño gráfico del mástil. Como resultado se obtiene que las únicas piezas que se deben modificar son las piezas M22.1 y M22.2. Las nuevas dimensiones de estas piezas se obtienen del Anexo A. Modificando sólo el croquis de la geometría común se obtienen las dos nuevas piezas.

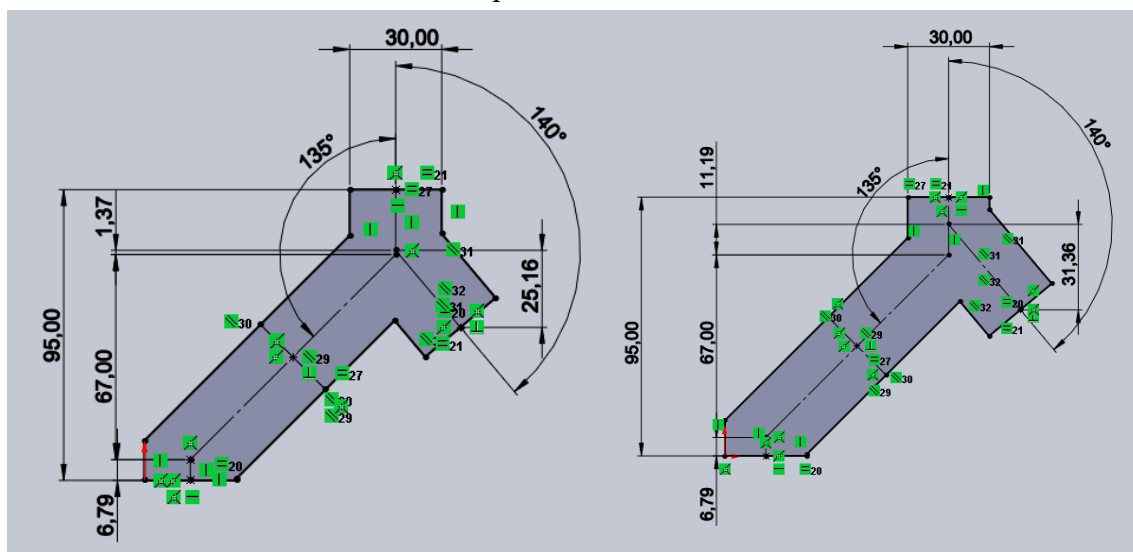


Figura 6.134 A la izquierda: croquis de la pieza M22. A la derecha: croquis de la nueva pieza M32.

Se ha decidido disminuir el juego a 0.2mm entre las piezas del mástil que deben ajustar. Esto está motivado por la desviación que se ha producido al montar el mástil en la anterior versión por un juego excesivo.

6.4.1.2 Base

Se ha incluido un radio de acuerdo en la pieza B21 para evitar la aparición de grietas.

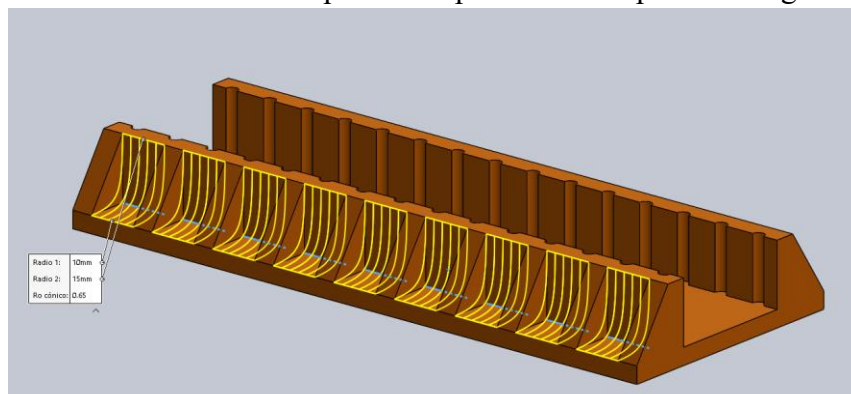


Figura 6.135 Radio de acuerdo de la nueva pieza B31.

6.4.2 Ensamblaje

Gracias a la asociatividad de Solid Works no es necesario modificar este archivo, puesto que se actualiza de forma automática con las modificaciones de las piezas que lo componen. (9)

6.4.3 Impresión

Para la impresión de estas piezas se usaron los mismos parámetros que para las piezas de la versión anterior, obteniéndose unos tiempos prácticamente iguales.

La mayor diferencia se encuentra en la pieza B31 en la cual se han eliminado las grietas gracias a los radios de acuerdo, usando los parámetros de impresión de la **Tabla 6.14**.

No se disponen de datos sobre el tiempo de la pieza B21 ya que no fue impresa. Como resultado de la impresión de la pieza B31 se ha obtenido un tiempo teórico de 6 horas y 2 minutos y un consumo de material de 46 gramos. Finalmente, el tiempo real de impresión fue de 6 horas 33 minutos.

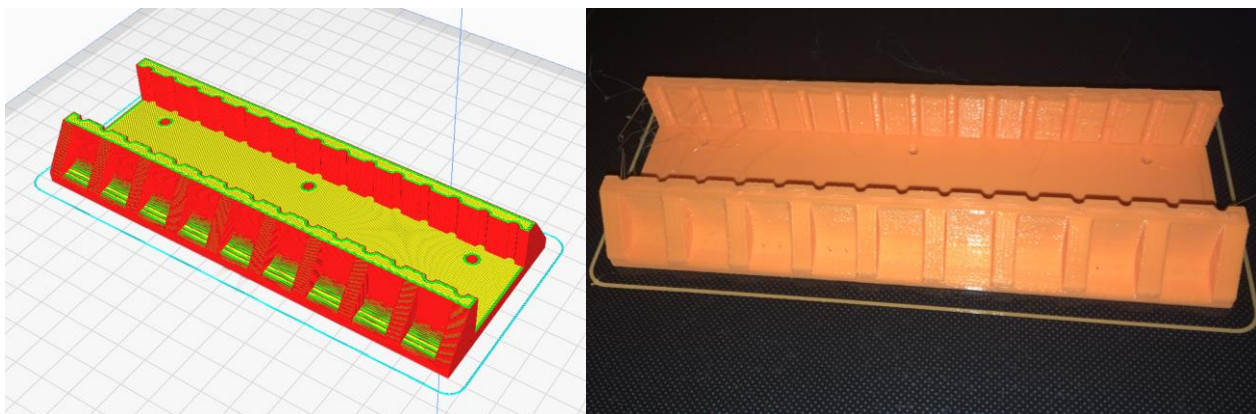


Figura 6.136 A la izquierda: modelo laminado de la pieza. A la derecha: fotografía de la pieza impresa.

6.4.4 Montaje

La disminución del juego en las piezas del mástil permitió lograr una mayor precisión geométrica al unir sus piezas.



Figura 6.137 Desviación en el montaje del mástil de la versión 2.



Figura 6.138 Desviación en el montaje del mástil de la versión 3.

6.4.5 Ensayo

Como último paso antes de realizar la prueba de funcionamiento, se ha comprobado la resistencia el nuevo mástil sometiéndolo al peso del modelo del cubo de calibración.

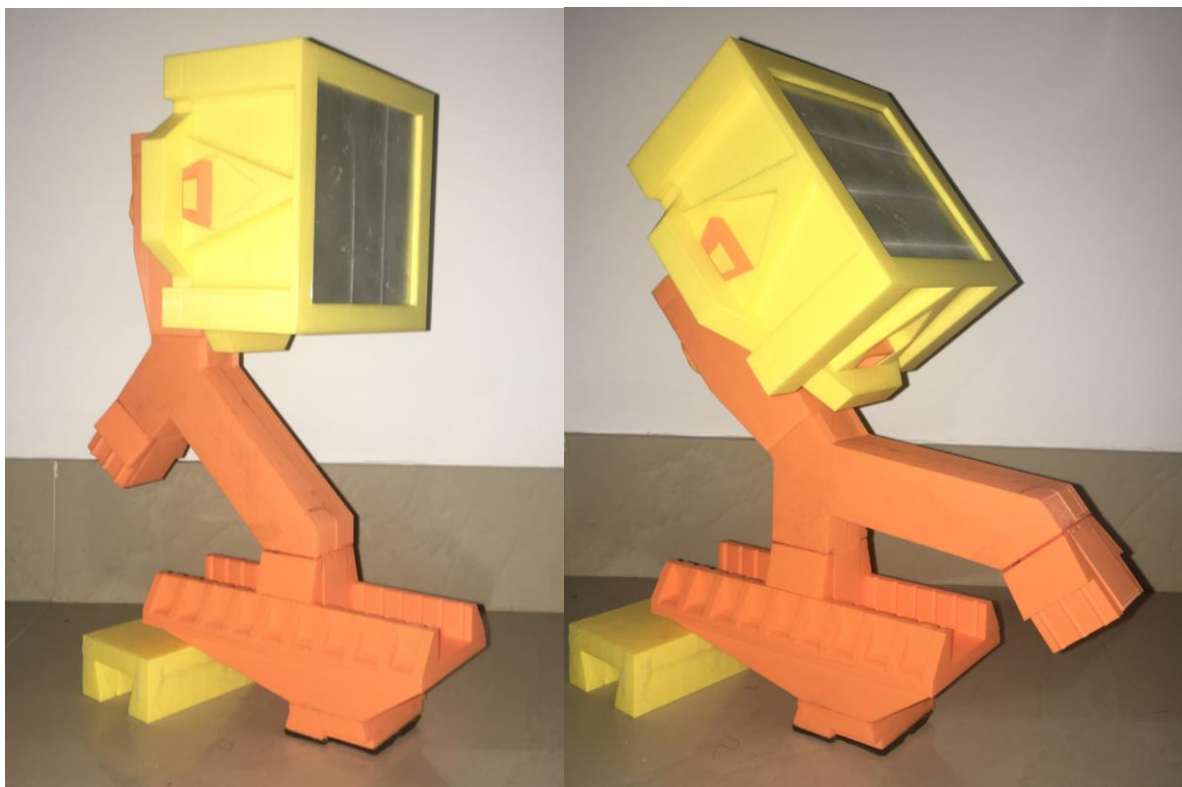


Figura 6.139 Utillaje terminado en su posición vertical y en la inclinada.

7 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

Para comprobar la utilidad del del útil se realizaron tres pruebas de funcionamiento. Estas pruebas se realizaron para distintas distancias entre las cámaras. De esta forma se puede determinar si el útil será efectivo para realizar calibraciones con distintos volúmenes de control.



Figura 7.1 Imagen de las cámaras a su máxima distancia.

Al comenzar la calibración, hay que colocar el patrón en frente de las cámaras, en la primera posición indicada en **Figura 1.3** Posiciones para calibrar el software., de forma que ambas enfoquen hacia el punto central. Esto se realiza con la ayuda de una cruz que aparece en la imagen captada por las cámaras.



Figura 7.2 Imagen del utillaje colocofo frente a las cámaras.

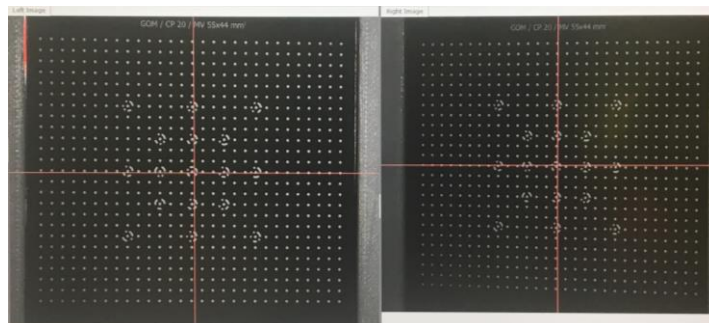


Figura 7.3 Imagen de la interface con la cruz centrada y alineada en ambas cámaras.

A continuación, se realizan las capturas en las trece posiciones. Los resultados de dichas capturas para las tres pruebas realizadas se muestran en la siguiente figura.

Distancia entre cámaras (mm)		
170	250	370
Position 1 Center distance. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 0.6° Object rotation for camera 1: 0.8°	Position 1 Center distance. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 0.5° Object rotation for camera 1: 0.5°	Position 1 Center distance. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 359.4° Object rotation for camera 1: 359.2°
Position 2 Close to sensor. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 0.5° Object rotation for camera 1: 0.7°	Position 2 Close to sensor. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 0.4° Object rotation for camera 1: 0.2°	Position 2 Close to sensor. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 359.3° Object rotation for camera 1: 359.0°
Position 3 Far away from sensor. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 0.5° Object rotation for camera 1: 0.7°	Position 3 Far away from sensor. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 0.4° Object rotation for camera 1: 0.4°	Position 3 Far away from sensor. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 359.3° Object rotation for camera 1: 359.1°
Position 4 Center distance. Panel position 0°. Tilt 40° up. Snap view Object rotation for camera 0: 356.8° Object rotation for camera 1: 6.7°	Position 4 Center distance. Panel position 0°. Tilt 40° up. Snap view Tilt warning: Unable to check tilt angle Object rotation for camera 0: 358.1° Object rotation for camera 1: 7.5°	Position 4 Center distance. Panel position 0°. Tilt 40° up. Snap view Tilt warning: Unable to check tilt angle Object rotation for camera 0: 355.9° Object rotation for camera 1: 5.1°
Position 5 Center distance. Panel position 180°. Tilt 40° up. Snap view Object rotation for camera 0: 176.2° Object rotation for camera 1: 185.8°	Position 5 Center distance. Panel position 180°. Tilt 40° up. Snap view Tilt warning: Unable to check tilt angle Object rotation for camera 0: 177.9° Object rotation for camera 1: 187.1°	Position 5 Center distance. Panel position 180°. Tilt 40° up. Snap view Tilt warning: Unable to check tilt angle Object rotation for camera 0: 176.4° Object rotation for camera 1: 185.4°
Position 6 Left camera normal. Panel position 180°. Snap view Object rotation for camera 0: 179.5° Object rotation for camera 1: 179.7°	Position 6 Left camera normal. Panel position 180°. Snap view Object rotation for camera 0: 180.2° Object rotation for camera 1: 180.1°	Position 6 Left camera normal. Panel position 180°. Snap view Object rotation for camera 0: 179.4° Object rotation for camera 1: 179.2°
Position 7 Left camera normal. Panel position 270°. Snap view Object rotation for camera 0: 268.3° Object rotation for camera 1: 268.7°	Position 7 Left camera normal. Panel position 270°. Snap view Object rotation for camera 0: 268.4° Object rotation for camera 1: 268.5°	Position 7 Left camera normal. Panel position 270°. Snap view Object rotation for camera 0: 268.6° Object rotation for camera 1: 268.6°
Position 8 Left camera normal. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 358.3° Object rotation for camera 1: 358.7°	Position 8 Left camera normal. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 0.2° Object rotation for camera 1: 0.3°	Position 8 Left camera normal. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 358.7° Object rotation for camera 1: 358.7°
Position 9 Left camera normal. Panel position 90°. Snap view Object rotation for camera 0: 89.1° Object rotation for camera 1: 89.3°	Position 9 Left camera normal. Panel position 90°. Snap view Object rotation for camera 0: 88.6° Object rotation for camera 1: 88.6°	Position 9 Left camera normal. Panel position 90°. Snap view Object rotation for camera 0: 90.3° Object rotation for camera 1: 90.1°
Position 10 Right camera normal. Panel position 90°. Snap view Object rotation for camera 0: 90.5° Object rotation for camera 1: 90.3°	Position 10 Right camera normal. Panel position 90°. Snap view Object rotation for camera 0: 89.8° Object rotation for camera 1: 89.4°	Position 10 Right camera normal. Panel position 90°. Snap view Object rotation for camera 0: 91.3° Object rotation for camera 1: 90.8°
Position 11 Right camera normal. Panel position 180°. Snap view Object rotation for camera 0: 180.6° Object rotation for camera 1: 180.5°	Position 11 Right camera normal. Panel position 180°. Snap view Object rotation for camera 0: 181.4° Object rotation for camera 1: 180.9°	Position 11 Right camera normal. Panel position 180°. Snap view Object rotation for camera 0: 181.4° Object rotation for camera 1: 180.8°
Position 12 Right camera normal. Panel position 270°. Snap view Object rotation for camera 0: 270.9° Object rotation for camera 1: 271.0°	Position 12 Right camera normal. Panel position 270°. Snap view Object rotation for camera 0: 270.1° Object rotation for camera 1: 269.8°	Position 12 Right camera normal. Panel position 270°. Snap view Object rotation for camera 0: 270.3° Object rotation for camera 1: 270.0°
Position 13 Right camera normal. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 359.4° Object rotation for camera 1: 359.4°	Position 13 Right camera normal. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 359.9° Object rotation for camera 1: 359.6°	Position 13 Right camera normal. Panel position 0°. Snap view Object rotation for camera 0: 359.1° Object rotation for camera 1: 358.8°

Figura 7.4 Posiciones captadas en las pruebas.

Como puede verse en la **Figura 7.4** Posiciones captadas en las pruebas., la desviación en la mayoría de las posiciones de las tres pruebas es inferior a 1°. Además, todas las posiciones fueron aceptadas por el software en la primera captura, por lo que el tiempo del proceso de tomar las fotos apenas necesita tres minutos.

Los resultados de las pruebas fueron los siguientes

Tabla 7.1 Resultados pruebas de funcionamiento.

Distancia entre cámaras (mm)	Desviación de la calibración (píxeles)
170	0.02
250	0.018
370	0.017

Se ha conseguido calibrar el software de forma rápida y efectiva, cumpliendo además el objetivo de lograr una desviación en la calibración de la mitad del máximo permitido, es decir, la mitad de 0.04 píxeles.

8 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

8.1 Conclusiones

Tras haber obtenido un resultado satisfactorio en las pruebas de funcionamiento se puede concluir que se ha cumplido el principal objetivo de este proyecto, reducir el tiempo del proceso de calibración del software ARAMIS y su precisión, habiendo reducido la desviación por debajo de 0.02 píxeles.

También se ha demostrado el potencial de la tecnología DFM, en concreto de las Impresoras 3D “domésticas”. Y es que, a pesar de que su precio no supera los 200€, se han podido fabricar en ella la totalidad de las piezas con una precisión y resistencia bastante considerables⁴. En comparación con otras tecnologías con las que se podrían haber fabricado el utillaje, como el mecanizado o la fundición, es la más barata en cuanto a maquinaria y en cuanto a mano de obra, ya que no requiere de operarios de taller cualificados. El hecho de poder disponer de tu propia Impresora 3D en la oficina o en la vivienda permite obtener las piezas de forma casi inmediata, ya que no se necesita transporte. Todo ello la convierte en la mejor alternativa para la fabricación de pequeños útiles y modificaciones de máquinas para lograr un mejor funcionamiento, incluso a nivel industrial. Buena muestra de ello se encuentra en la fábrica de Heineken en Sevilla, donde cuentan con Impresoras 3D para fabricar sus propias herramientas o crear modificaciones a máquinas, como, por ejemplo, una cubierta para los sensores de una cinta transportadora para evitar atascos. En las aplicaciones donde han usado esta tecnología han logrado un descenso entre el 70% y el 90% tanto en el coste como en el tiempo de entrega. (29)



Figura 8.1 Imagen de herramienta fabricada por Heineken.
Imagen obtenida de (29)

⁴ el modelo del cubo de calibración pesa 1.25kg

A continuación, se muestra una tabla resumen con el tiempo de impresión de las piezas y del coste del material, el cual es de 20€/kg.

Tabla 8.1 Resumen de recursos empleados.

Pieza	Cantidad	Tiempo Unidad		Tiempo Total		Material Unidad (g)	Material (g)	Coste Material
		Horas	Min	Horas	Min			
C 31	1	10	2	10	2	87	87	1,74 €
C 32	1	6	28	6	28	83	83	1,66 €
C 33	4		16	1	4	2	8	0,16 €
C 34	1		3	0	3	1	1	0,02 €
C 35	1		8	0	8	1	1	0,02 €
M 31	1	3	57	3	57	43	43	0,86 €
M 32.1	1	2	26	2	26	34	34	0,68 €
M 32.2	1	2	38	2	38	27	27	0,54 €
M 33	1		13	0	13	1	1	0,02 €
M 34	1		28	0	28	4	4	0,08 €
M 35	2	1	2	2	4	10	20	0,40 €
M 36	2		53	1	46	8	16	0,32 €
B 31	1	6	33	6	33	46	46	0,92 €
B 32	1	4	50	4	50	50	50	1,00 €
B 33	1	1	2	1	2	14	14	0,28 €
				43	42		435	8,70 €

8.2 Desarrollos futuros

Habiendo comprobado la funcionalidad del mecanismo, propongo como proyecto futuro la utilización de software de optimización topológica para construir las piezas de forma más eficiente, que es una de las aplicaciones más interesantes de la tecnología ALM.



Figura 8.2 Ejemplo de pieza optimizada topológicamente. Imagen obtenida de (38)

También se le pueden hacer algunas mejoras para eliminar holguras y conseguir mayor precisión en las calibraciones. Estas holguras se encuentran principalmente en la unión entre el trípode y el útil y en el sistema de posicionamiento rotacional, en el cual se podría diseñar la pieza C33 con otra geometría que consiguiera aplicar mayor presión.

Sería interesante aumentar la longitud de la base, así se podrían calibrar las cámaras para un volumen de control mayor.

Todas estas mejoras podrían conseguir bajar la desviación en la calibración de los 0.017 píxeles, que es el mejor resultado obtenido mediante este útil.

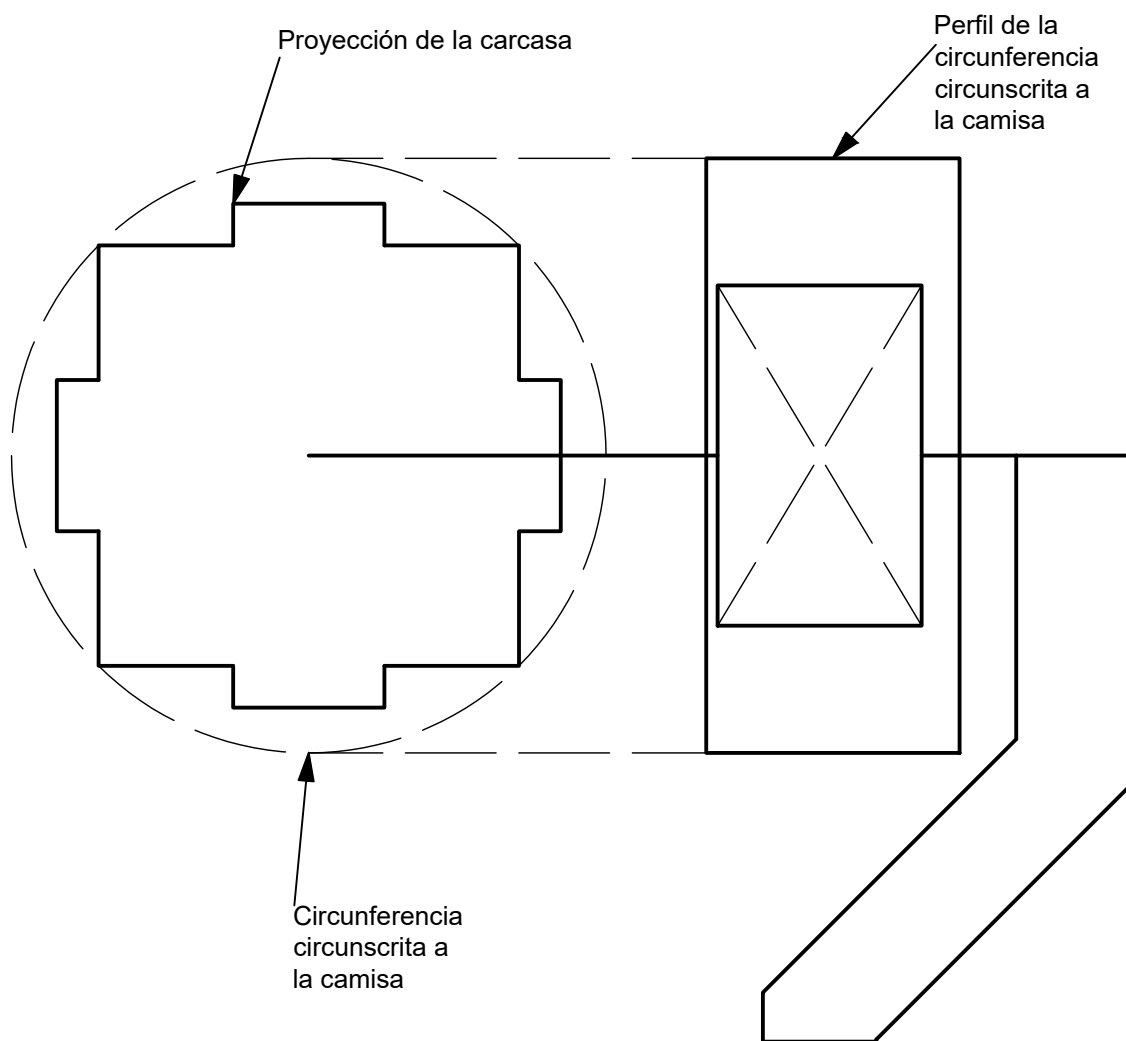
REFERENCIAS

1. *aramis_hw-2-2lt-4-5-5lt-12-hs-adjustable_en_rev*. 2013.
2. CUSTOMPART.NET. [En línea] [Citado el: 21 de Abril de 2019.] <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>.
3. ARQHYS ARQUITECTURA. [En línea] [Citado el: 23 de Abril de 2019.] <https://www.arqhys.com/construccion/cad-historia.html>.
4. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 26 de Abril de 2019.] <https://es.wikipedia.org/wiki/AutoCAD>.
5. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 27 de Abril de 2019.] <https://es.wikipedia.org/wiki/CATIA>.
6. SOLIDBI. [En línea] [Citado el: 27 de Abril de 2019.] <https://solid-bi.es/solidworks/>.
7. Pixel Sistemas. [En línea] [Citado el: 28 de Abril de 2019.] <https://www.pixelsistemas.com/solid-edge>.
8. FreeCAD WIKI. [En línea] [Citado el: 28 de Abril de 2019.] https://www.freecadweb.org/wiki/About_FreeCAD/es.
9. González, Sergio Gómez. *El gran libro de SolidWorks*. Barcelona : MARCOMBO, EDICIONES TÉCNICAS, 2008. ISBN 978-84-267-1458-9.
10. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 4 de Mayo de 2019.] <https://es.wikipedia.org/wiki/G-code>.
11. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 4 de Mayo de 2019.] [https://en.wikipedia.org/wiki/Slicer_\(3D_printing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Slicer_(3D_printing)).
12. ALL3DP. [En línea] [Citado el: 4 de Mayo de 2019.] <https://all3dp.com/es/1/programas-software-impresora-3d-printer-software-3d-gratis/>.
13. TriMaker. [En línea] [Citado el: 4 de Mayo de 2019.] <https://trimaker.com/mejor-software-de-laminado-3d-n-12-simplify3d-trimaker/>.
14. of3lia. [En línea] [Citado el: 11 de Mayo de 2019.] https://of3lia.com/ultimaker-cura/#Modifica_los_modelos_3D_a_tu_gusto.
15. Impresiontresde. [En línea] [Citado el: 6 de Marzo de 2019.] <https://impresiontresde.com/soportes-e-impresion-3d-lo-que-nunca-te-cuentan/>.
16. QueCartucho.es. [En línea] [Citado el: 7 de Mayo de 2019.] https://quecartucho.es/blog/funciona-se-usa-una-impresora-3d/#Impresora_3D.
17. *Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process*. Bellehumeur, Céline, y otros. 2, s.l. : Journal of Manufacturing Processes, 2004, Vol. 6.
18. CUSTOMPART.NET. [En línea] [Citado el: 8 de Mayo de 2019.] <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>.
19. 3dfils. [En línea] [Citado el: 9 de Mayo de 2019.] https://www.3dfils.com/de/blog/20_historia3d.
20. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 9 de Mayo de 2019.] https://es.wikipedia.org/wiki/Proyecto_RepRap#Intenciones.
21. RepRap. [En línea] [Citado el: 9 de Mayo de 2019.] <https://reprap.org/wiki/Mendel/es>.
22. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 9 de Mayo de 2019.] https://es.wikipedia.org/wiki/Prusa_i3.

23. CREALITY. [En línea] [Citado el: 9 de Mayo de 2019.] <https://es.creality3d.cn/creality3d-ender-3-p00244p1.html>.
24. 3dfils. [En línea] [Citado el: 16 de Mayo de 2019.] https://www.3dfils.com/es/blog/18_directaobowden.
25. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 15 de Mayo de 2019.] https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_poli%C3%A1ctico.
26. Universitat Jaume I. [En línea] [Citado el: 15 de Mayo de 2019.] <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poli%C3%A1cido-l%C3%A1ctico/propiedades-del-pla?authuser=0>.
27. bq. *PLA filamento: ficha técnica*.
28. SYS 3D. [En línea] [Citado el: 19 de Abril de 2019.] <http://sys3d.com.ar/disenio-piezas-encaje-impresas-3d/>.
29. Staak, Steven van de. Ultimaker. [En línea] 21 de mayo de 2019. [Citado el: 2 de junio de 2019.] <https://ultimaker.com/en/stories/52879-heineken-ensuring-production-continuity-with-3d-printing>.
30. 3D MAKER MX. [En línea] 27 de Junio de 2018. [Citado el: 24 de Mayo de 2019.] <http://3dmaker.com.mx/turbina-impresa-en-3d/>.
31. Wikipedia. [En línea] [Citado el: 16 de Mayo de 2019.] De Materialgeezza - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4031955>.
32. Lawrance Livermore National Laboratory . [En línea] [Citado el: 24 de Mayo de 2019.] <https://acamm.llnl.gov/am-technology/powder-bed-am>.
33. 3D Market. [En línea] [Citado el: 23 de Mayo de 2019.] <https://www.3dmarket.mx/articulos/impresoras-3d-como-funcionan/>.
34. [En línea] [Citado el: 24 de Mayo de 2019.] <http://spanish.cncmachiningprototype.com/sale-8538155-high-speed-cnc-machining-5-axis-cnc-mill-for-turbine-blade-aluminum-tooth.html>.
35. Real Academia de Ingeniería. [En línea] [Citado el: 3 de Junio de 2019.] <http://diccionario.raing.es/es/lema/ortotrop%C3%ADa>.
36. Amazon. [En línea] [Citado el: 10 de Junio de 2019.] <https://www.amazon.es/Comgrow-Creality-Ender-Impresora-Aluminum/dp/B07BR3F9N6>.
37. gom. [En línea] [Citado el: 3 de junio de 2019.] <https://www.gom.com/metrology-systems/aramis/aramis-adjustable.html>.
38. ASIDEK. [En línea] 9 de enero de 2017. [Citado el: 7 de junio de 2019.] <https://www.asidek.es/la-optimizacion-topologica-la-impresion-3d/>.

En el anexo se encuentran los esquemas empleados para realizar el diseño y modelado de las piezas y los planos de montaje obtenidos a partir de los modelos.

Anexo A: Esquemas de diseño.



REVISIÓN:

3

TÍTULO:

Esquemas de Diseño

ESCALA 1:2

HOJA 1 DE 3

N.º DEL DIBUJO

Carcasa Y Mástil

A4

Centro de la
cara del cubo
de calibración

Eje de giro
del cubo de
calibración

Centro de
gravedad

40°

27

27

POSICIÓN VERTICAL

POSICIÓN INCLINADA

REVISIÓN:

3

TÍTULO:

Esquemas de Diseño

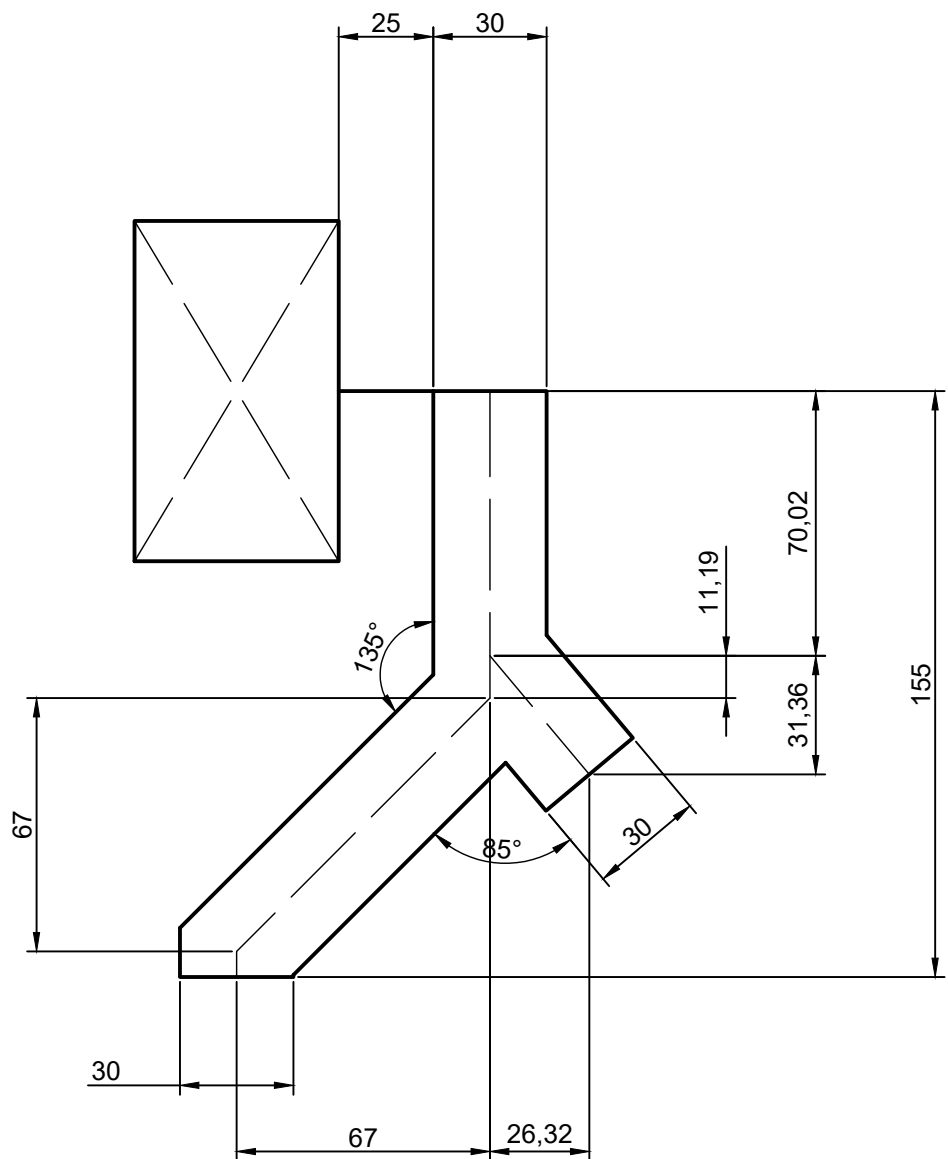
ESCALA 1:2

HOJA 2 DE 3

N.º DEL DIBUJO

Mástil

A4



REVISIÓN:

3

TÍTULO:

Esquemas de Diseño

ESCALA 1:2

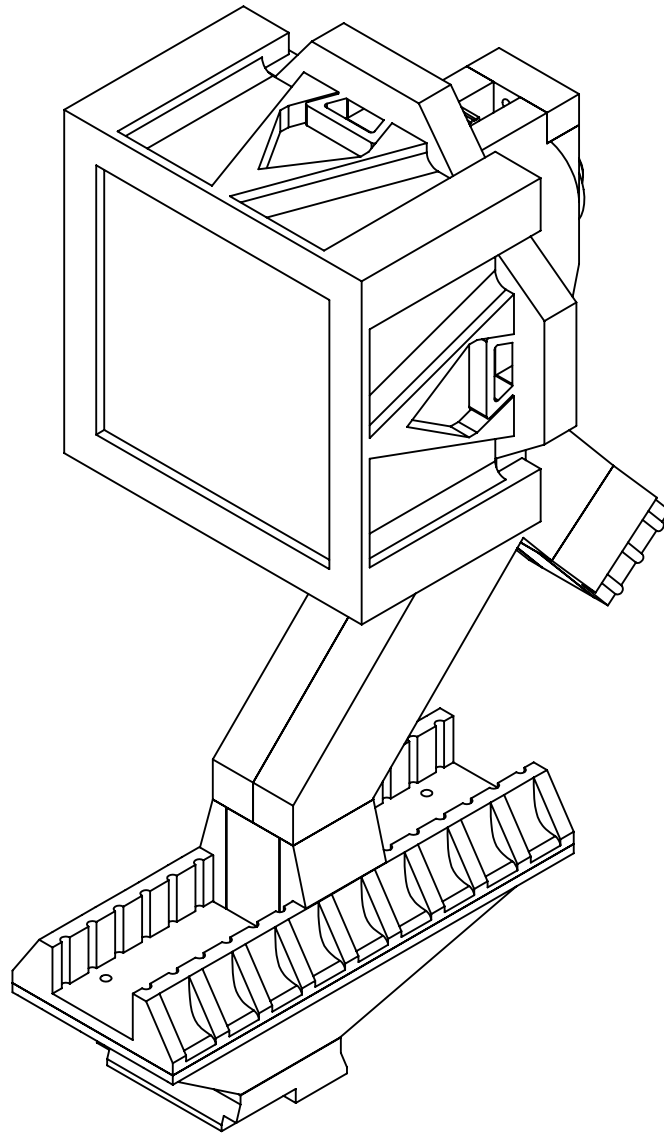
HOJA 3 DE 3

N.º DEL DIBUJO

Mástil

A4

Anexo B: Planos.



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

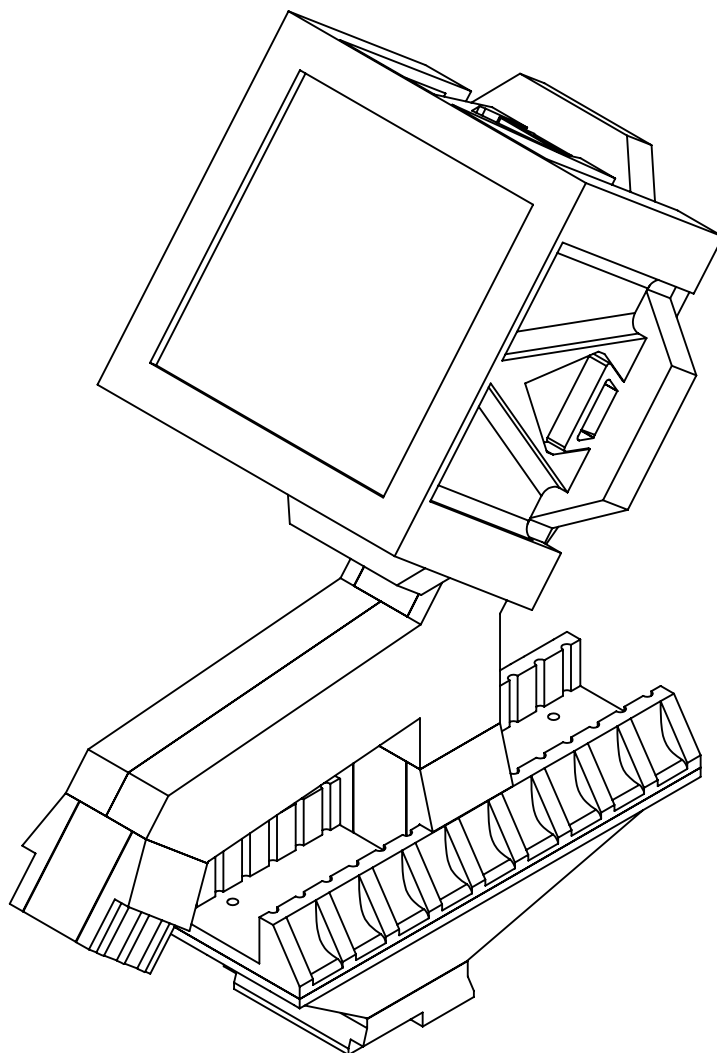
ESCALA:1:2

HOJA 1DE 18

N.º DE DIBUJO

Perspectiva Vertical

A4



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

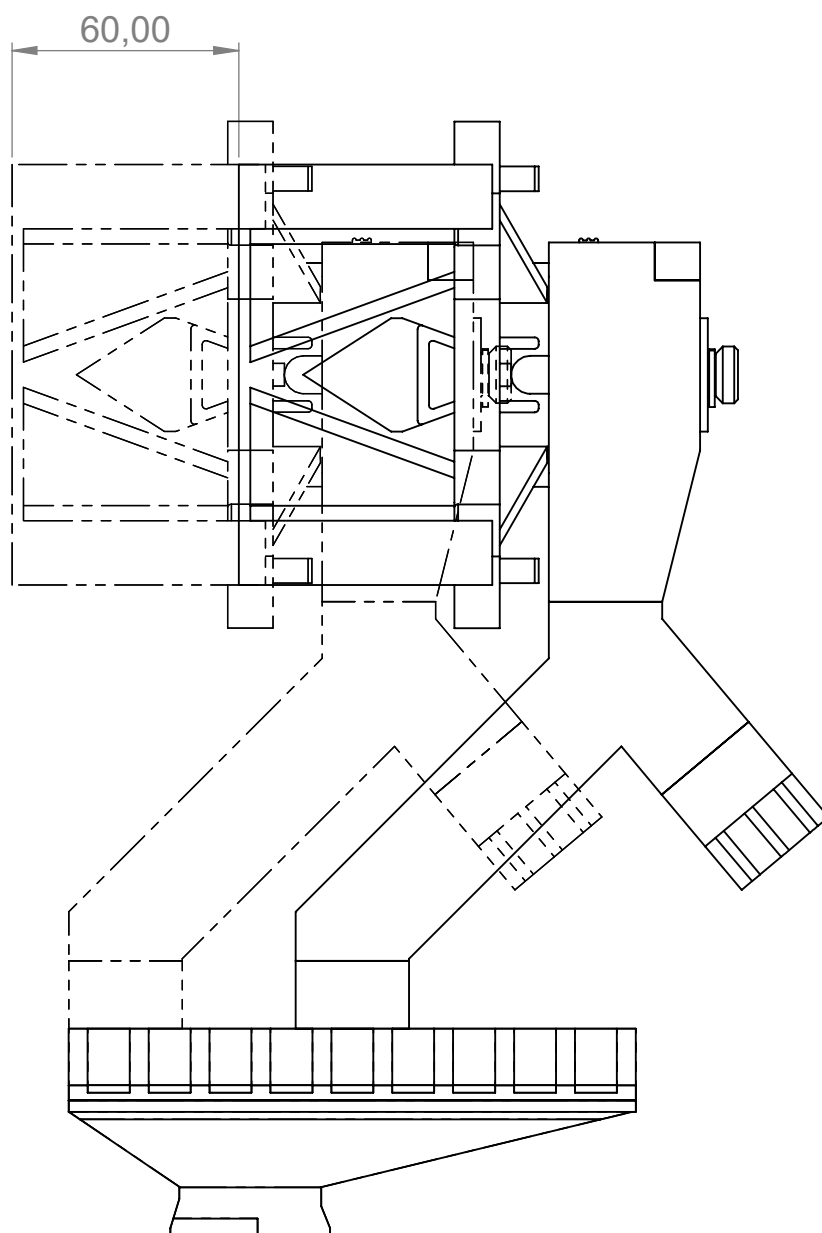
ESCALA:1:2

HOJA 2DE 18

N.º DE DIBUJO

Perspectiva Inclinado

A4



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

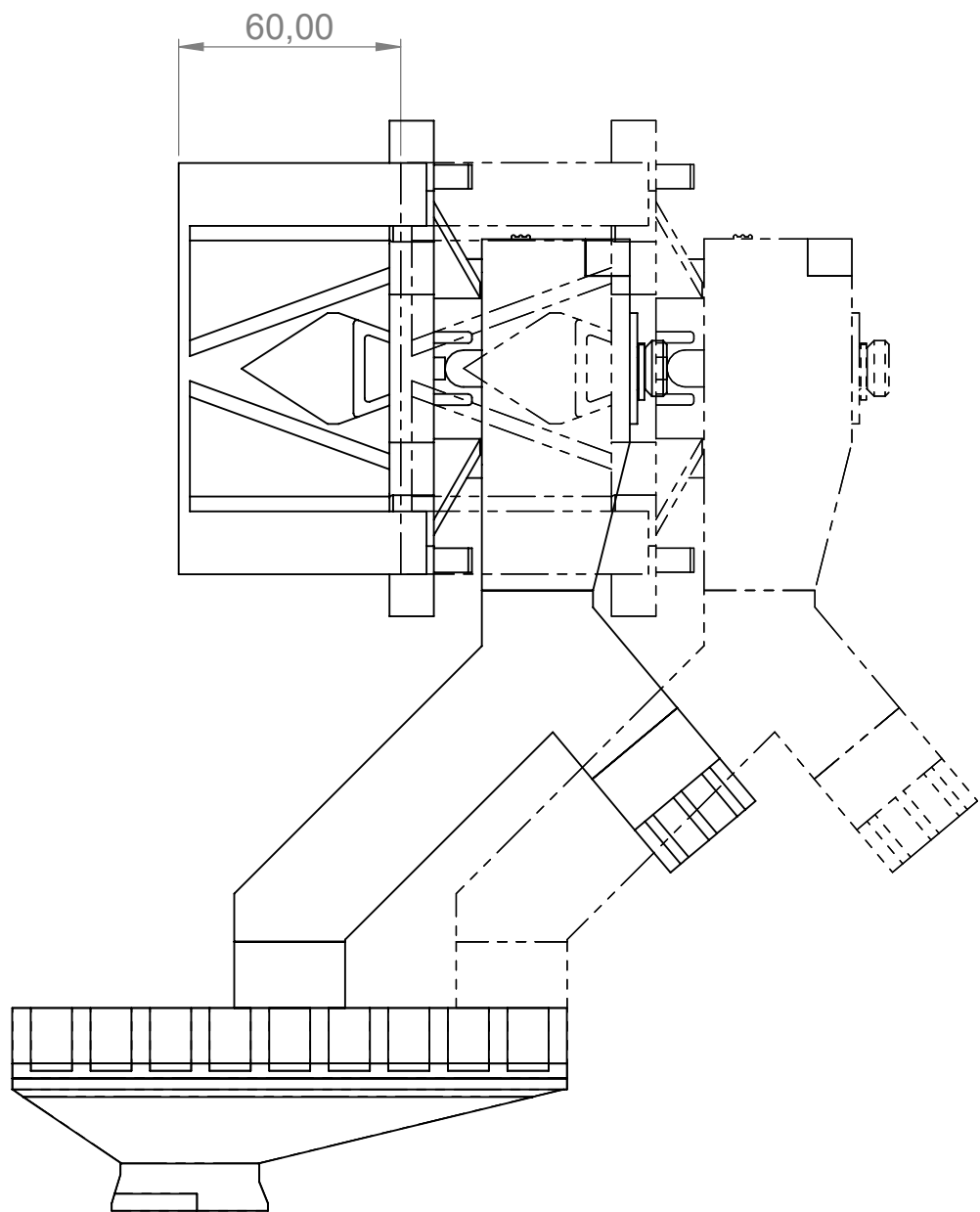
ESCALA:1:2

HOJA 3DE 18

N.º DE DIBUJO

Posición Adelantado

A4



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

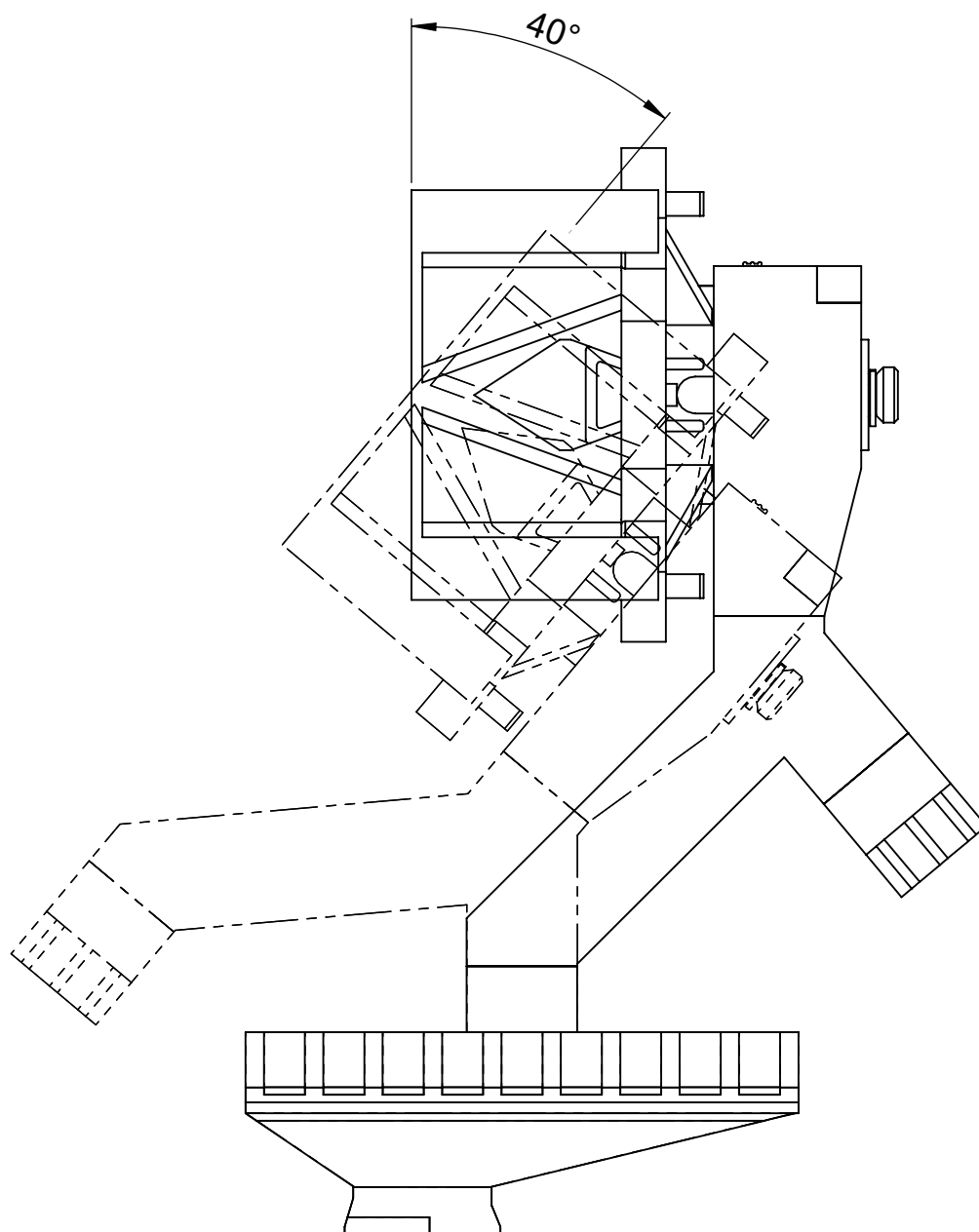
ESCALA:1:2

HOJA 4DE 18

N.º DE DIBUJO

Posición Atrasado

A4



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

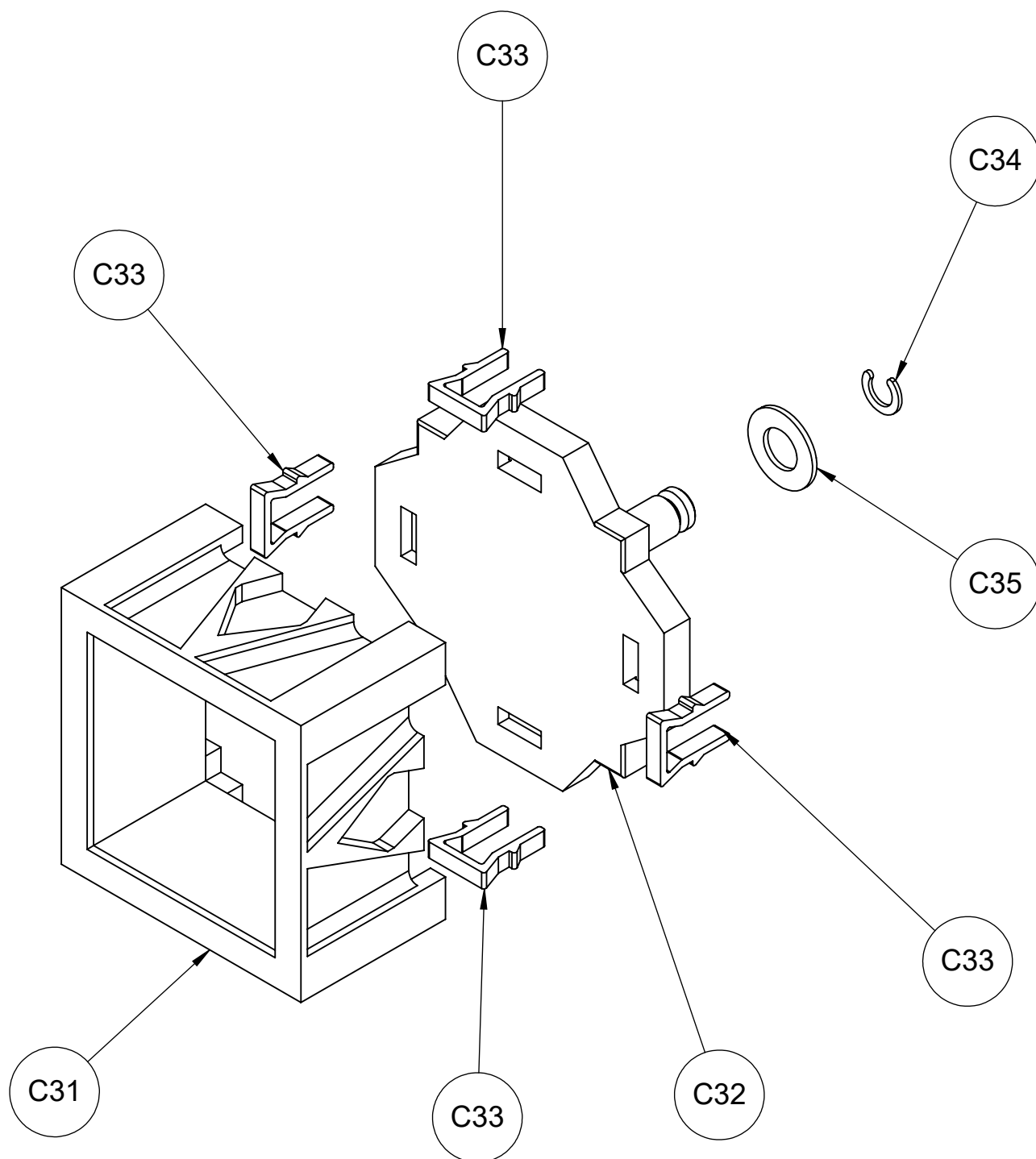
ESCALA:1:2

HOJA 5DE 18

N.º DE DIBUJO

Posición Inclinado

A4



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

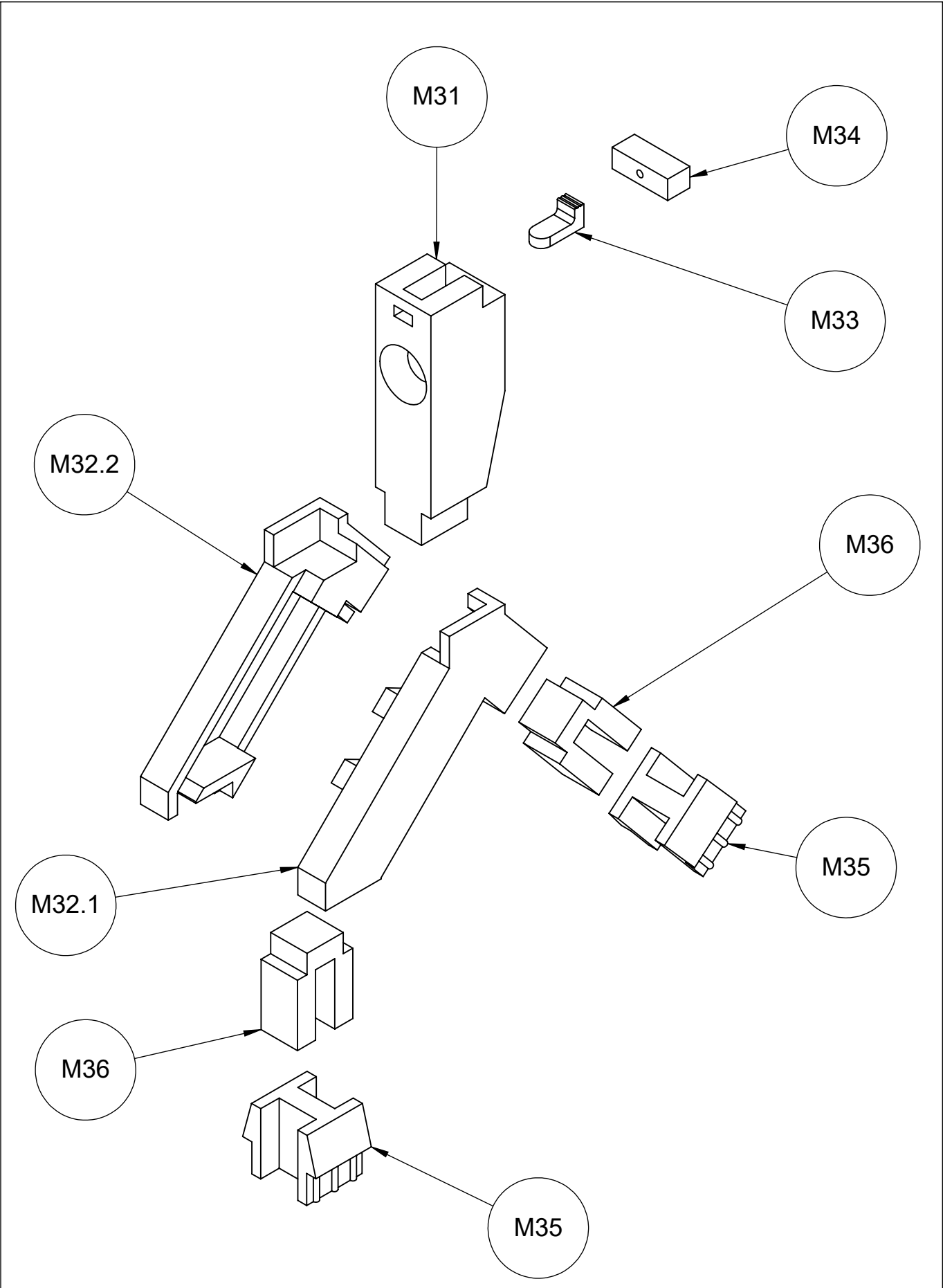
ESCALA:1:2

HOJA 6 DE 18

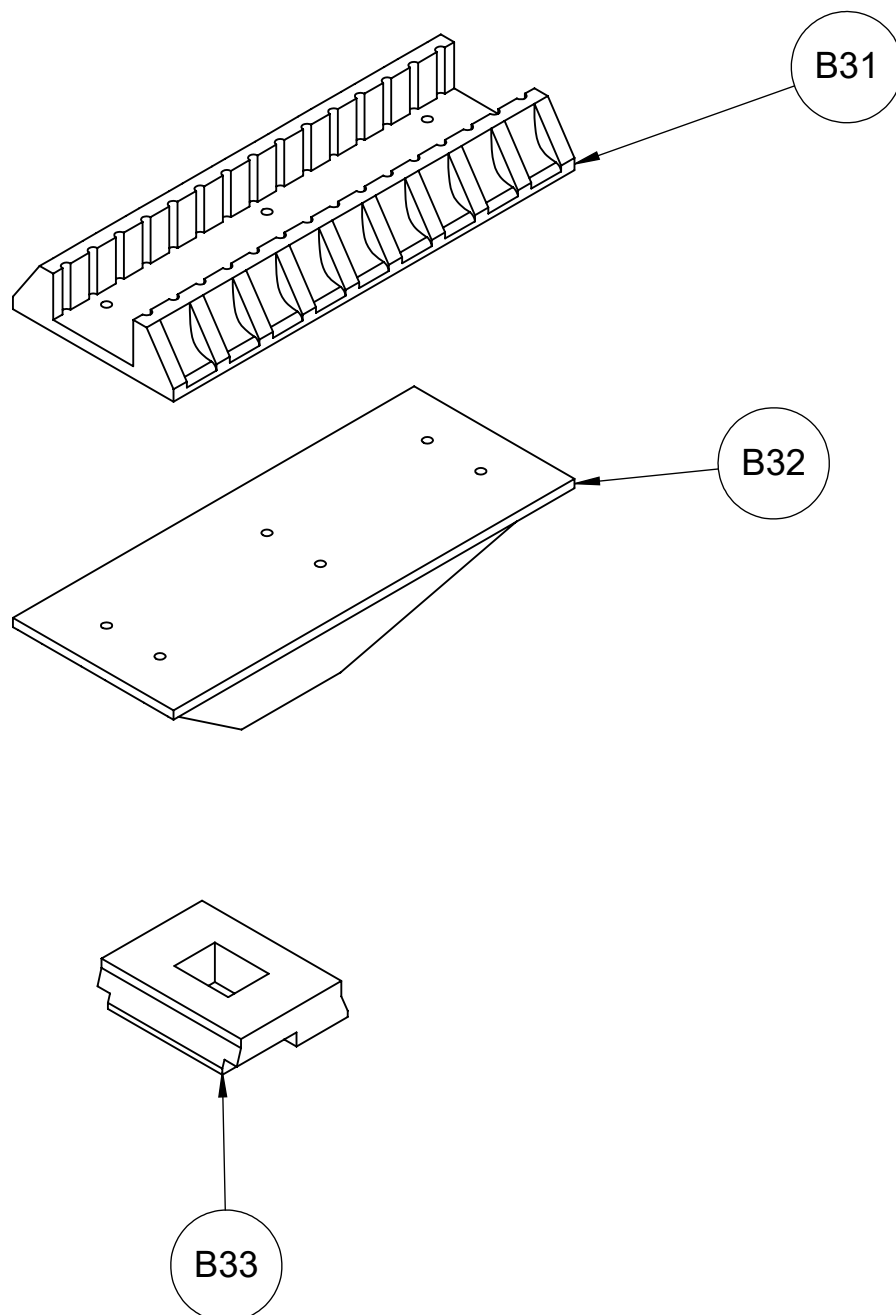
N.º DE DIBUJO

Despiece Carcasa

A4



REVISIÓN 3		TÍTULO: Planos Modelo	
ESCALA:1:2	HOJA 7DE 18	N.º DE DIBUJO Despiece Mástil	A4



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

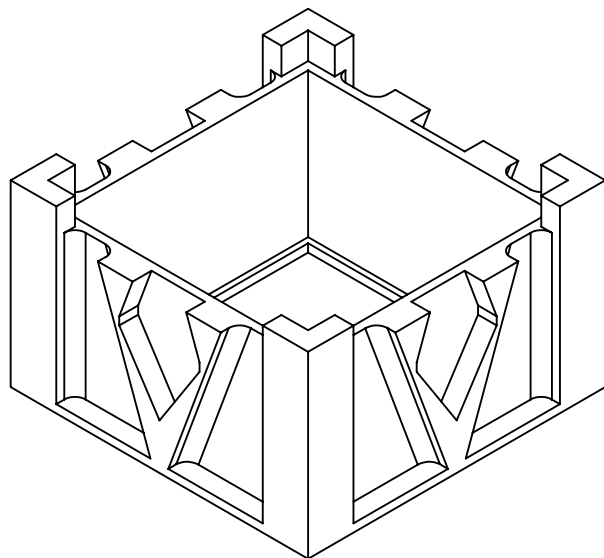
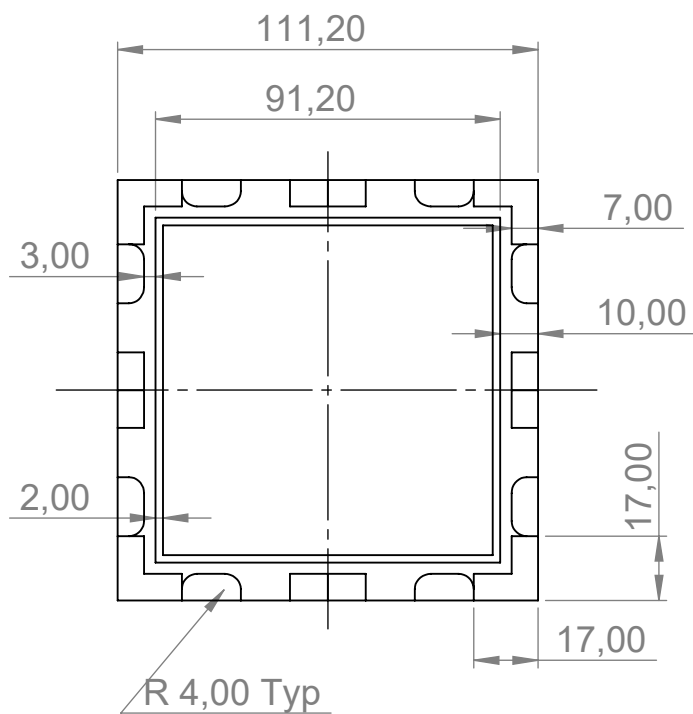
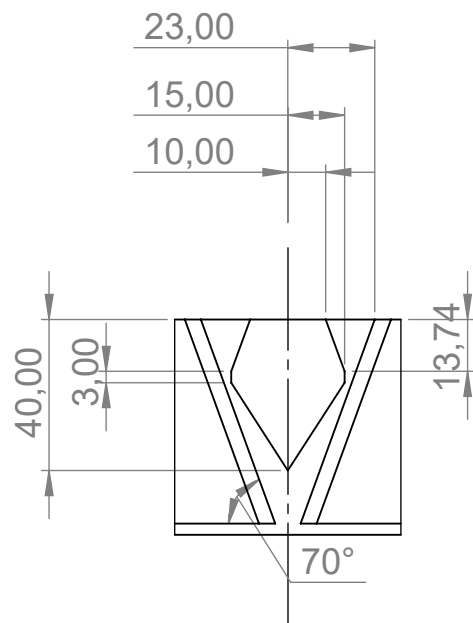
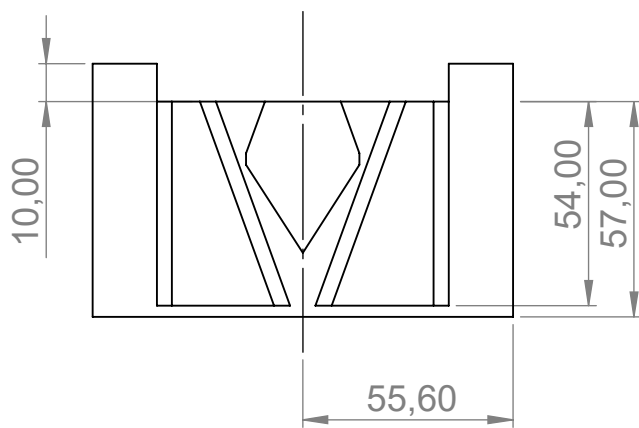
ESCALA:1:2

HOJA 8DE 18

N.º DE DIBUJO

Despiece Base

A4



REVISIÓN

3

TÍTULO:

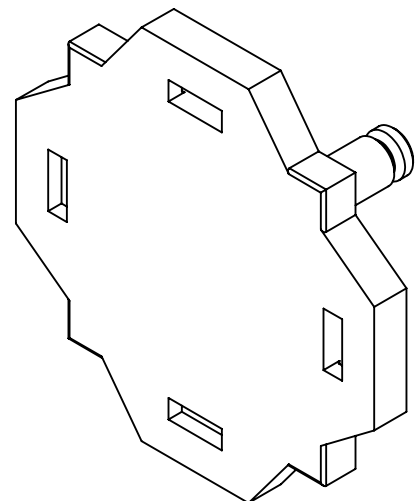
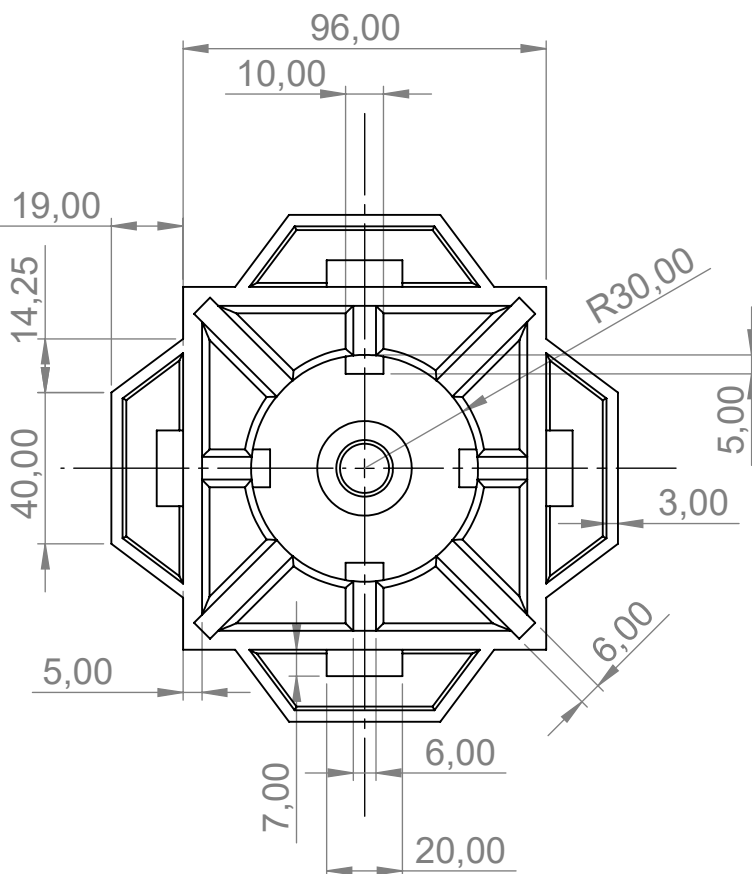
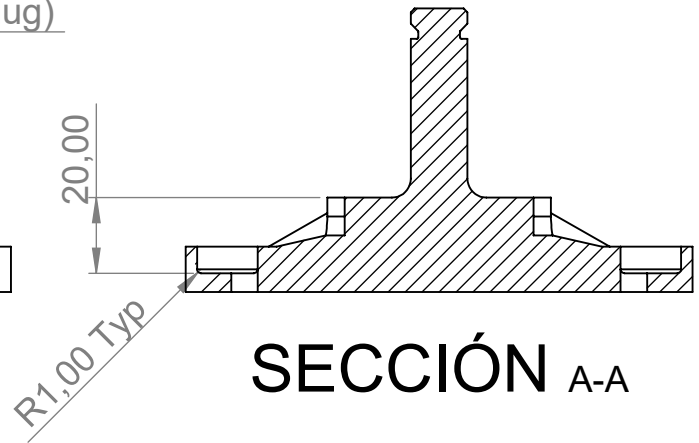
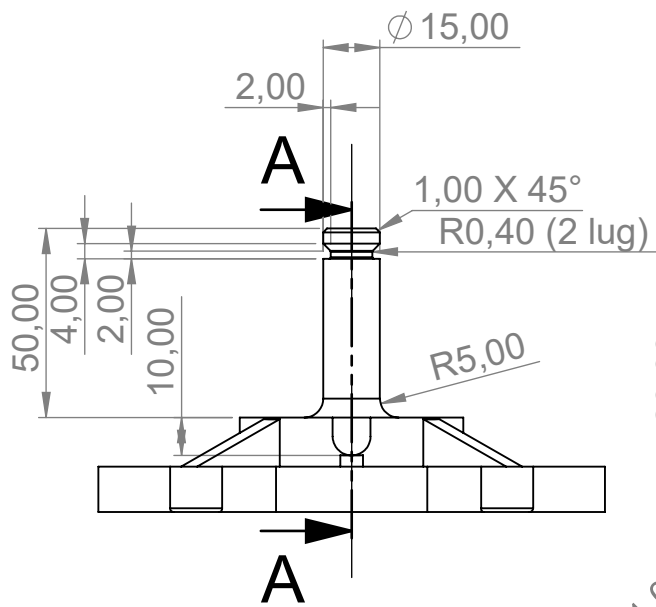
Planos Modelo

ESCALA:1:2

HOJA 9DE 18

N.º DE DIBUJO
C31

A4



REVISIÓN

3

TÍTULO:

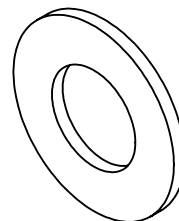
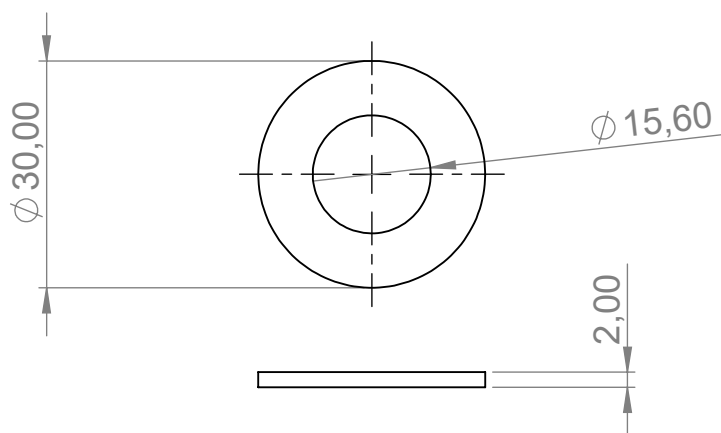
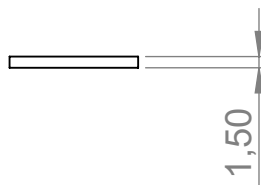
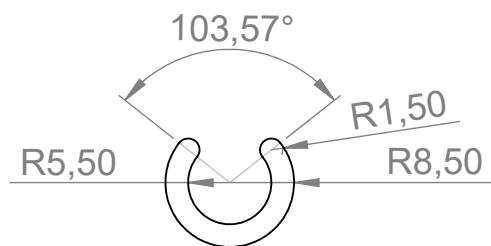
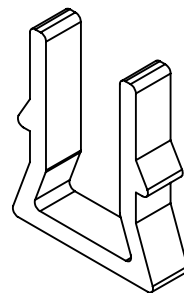
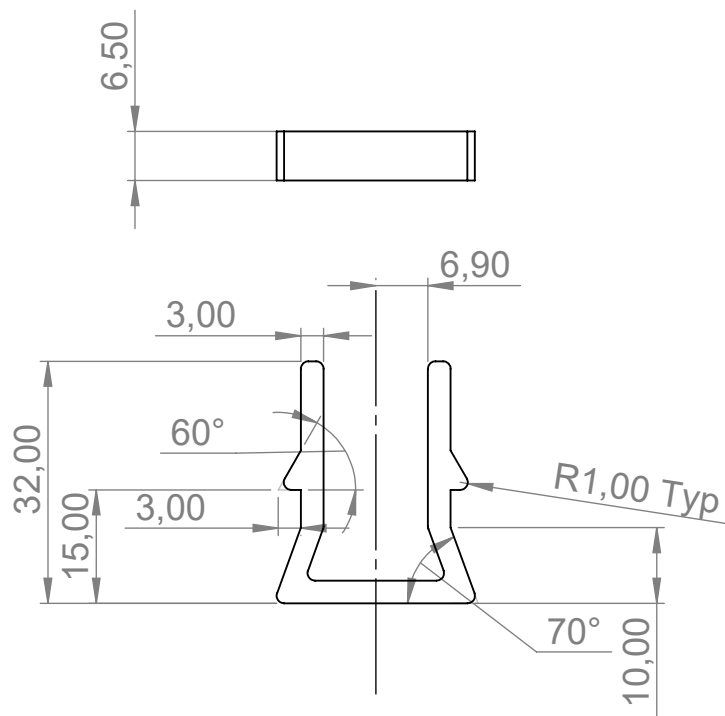
Planos Modelo

ESCALA: 1:2

HOJA 10 DE 18

N.º DE DIBUJO
C32

A4



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

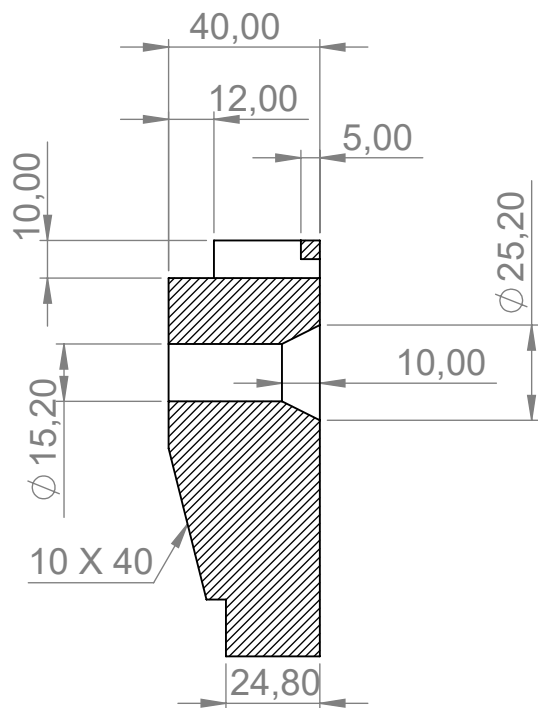
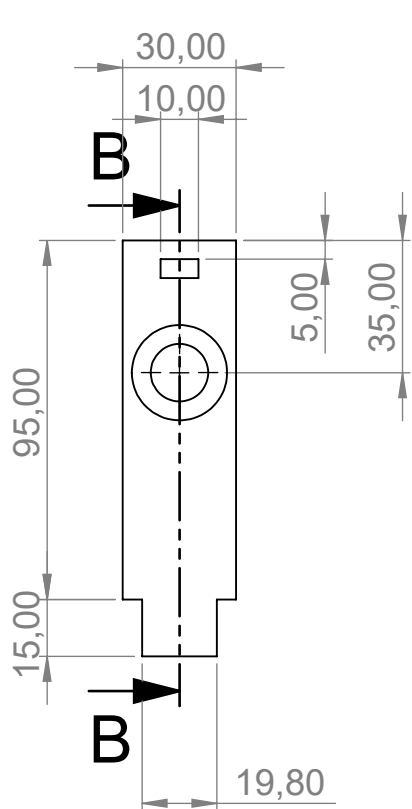
ESCALA: 1:1

HOJA 11 DE 18

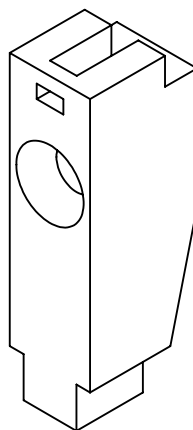
N.º DE DIBUJO

C33, C34 Y C35

A4



SECCIÓN B-B



REVISIÓN

3

TÍTULO:

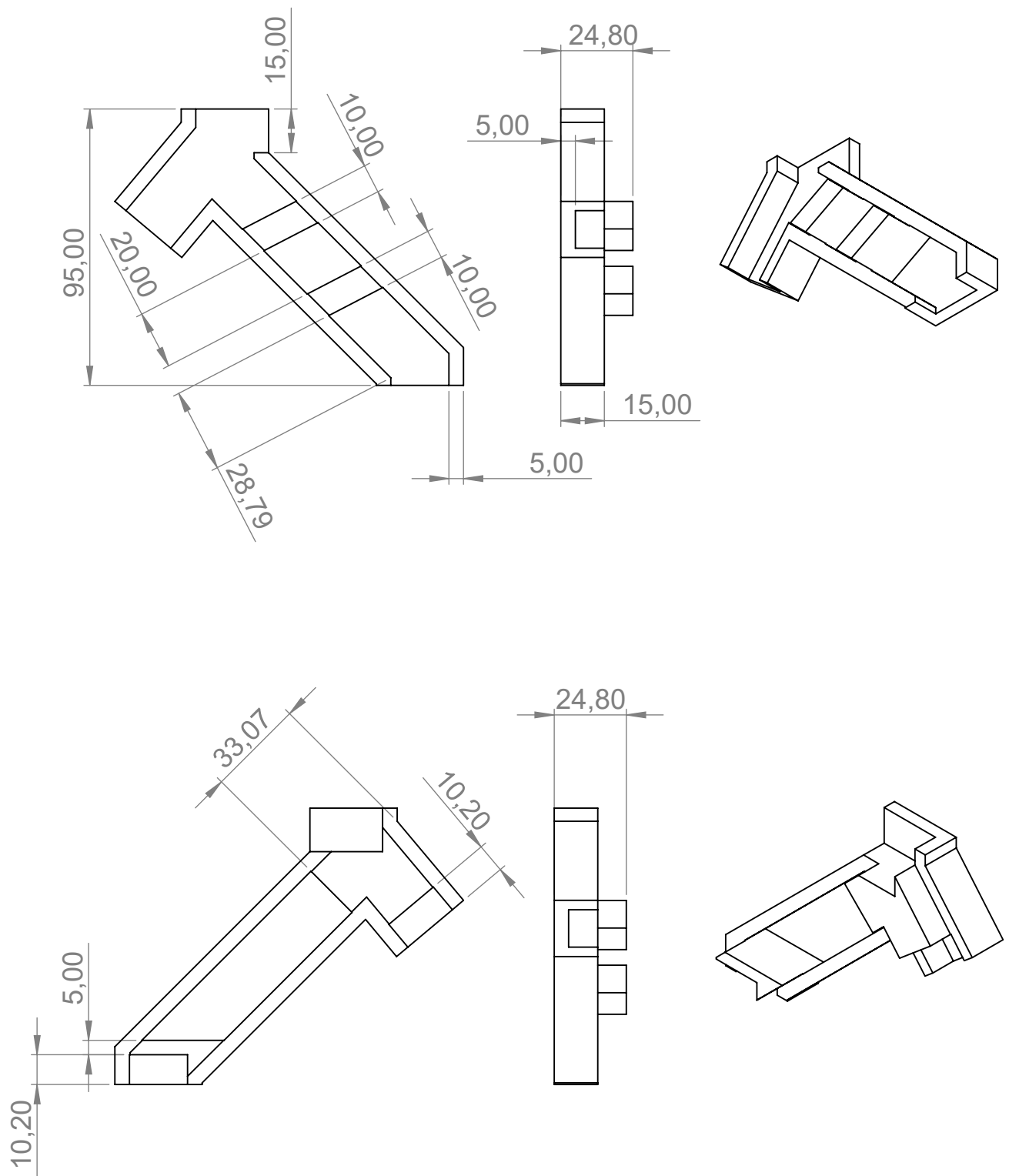
Planos Modelo

ESCALA: 1:2

HOJA 12 DE 18

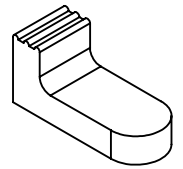
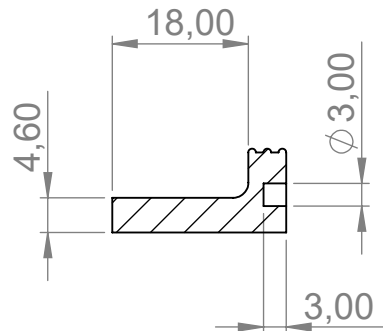
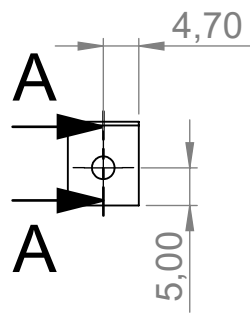
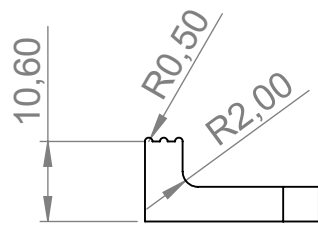
N.º DE DIBUJO
M31

A4

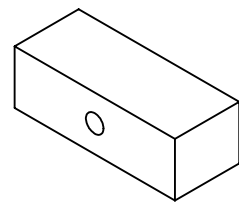
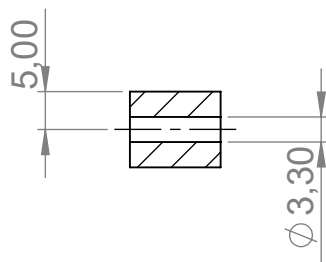
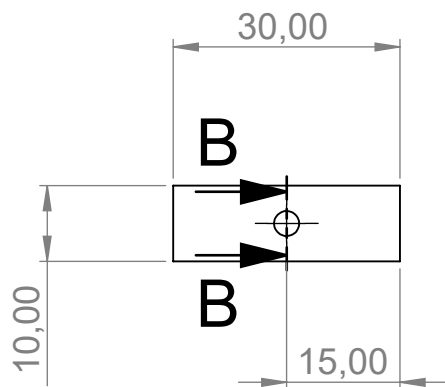
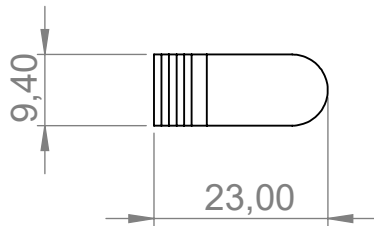


RESTO DE COTAS SE OBTIENEN DEL ANEXO A

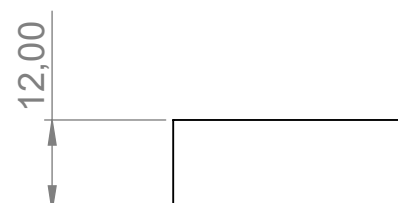
REVISIÓN 3	TÍTULO: Planos Modelo		
ESCALA:1:2	HOJA 13DE 18	N.º DE DIBUJO M32.1 Y M32.2	A4



SECCIÓN A-A



SECCIÓN B-B



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

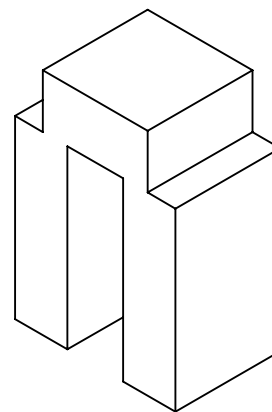
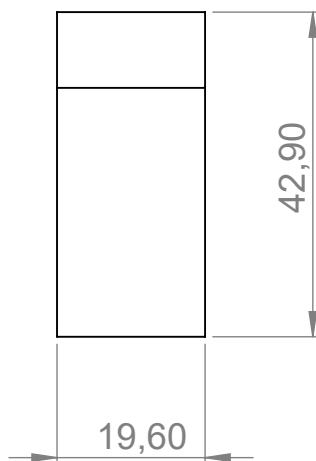
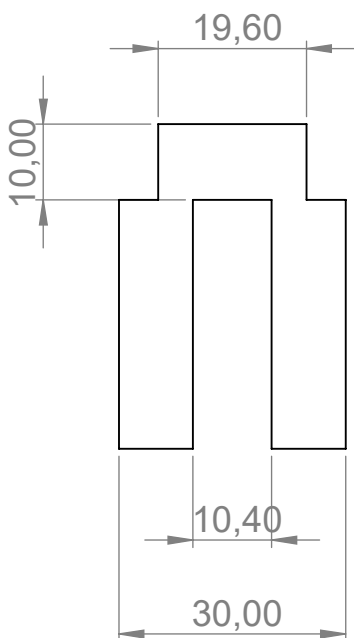
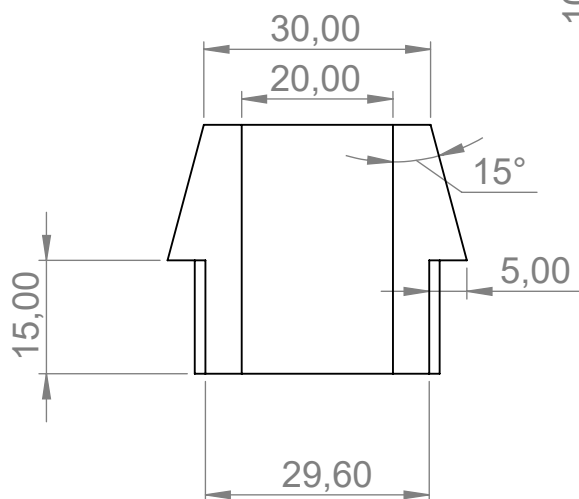
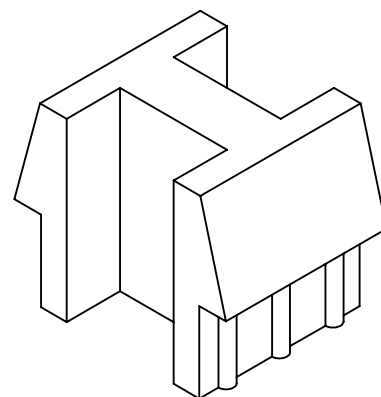
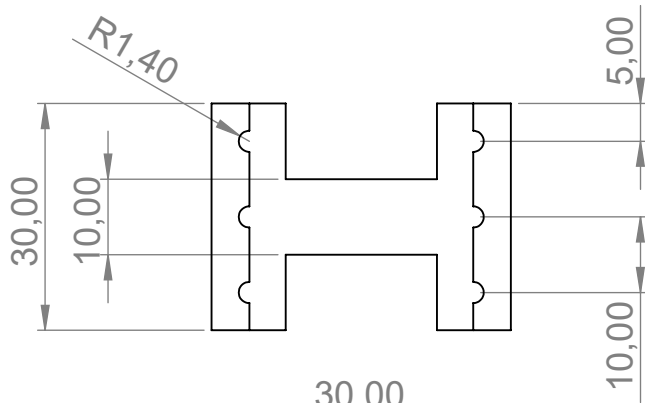
ESCALA: 1:1

HOJA 14 DE 18

N.º DE DIBUJO

M33 Y M34

A4



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

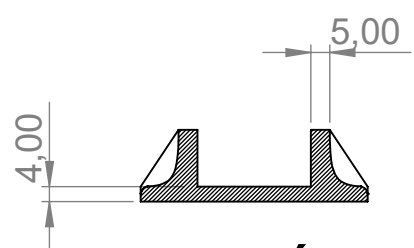
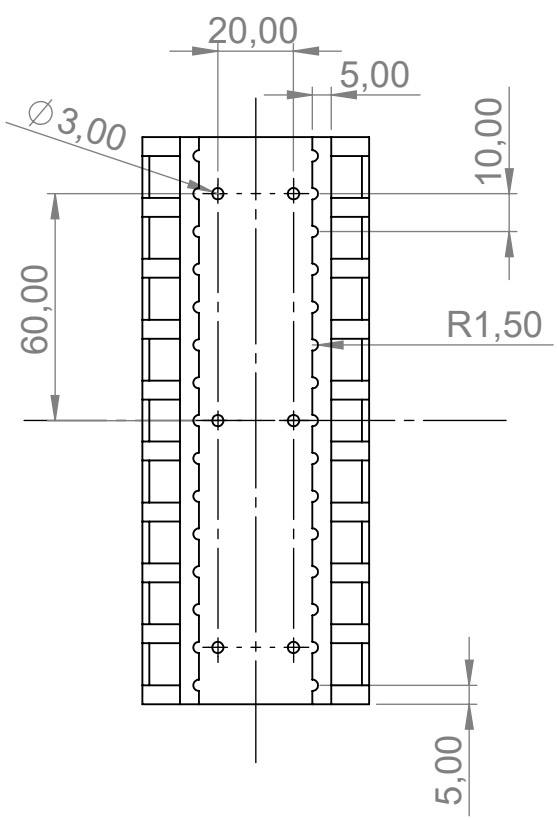
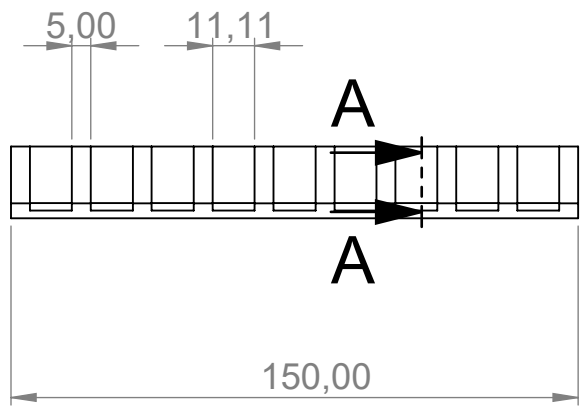
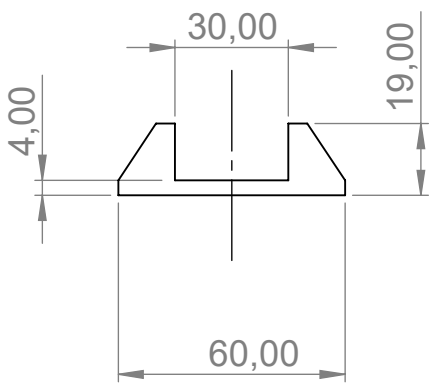
ESCALA:1:1

HOJA 15DE 18

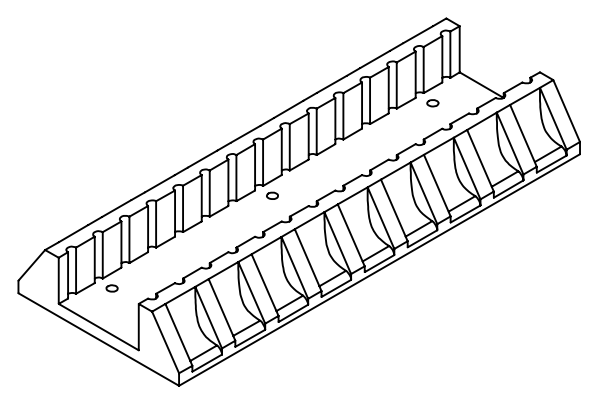
N.º DE DIBUJO

M35 Y M36

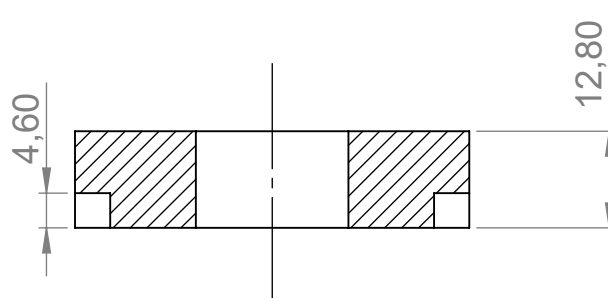
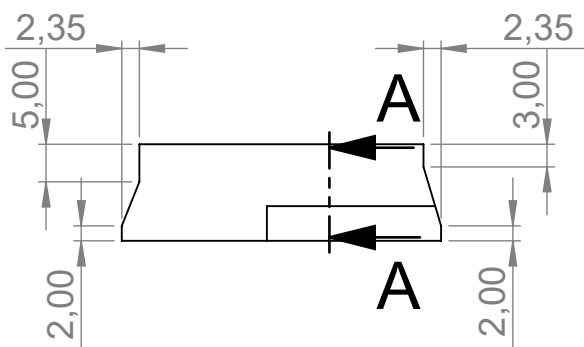
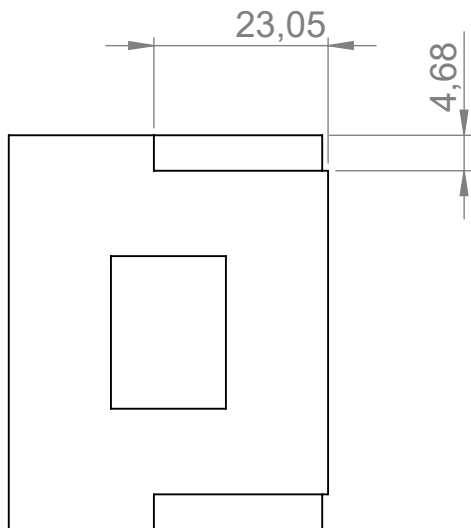
A4



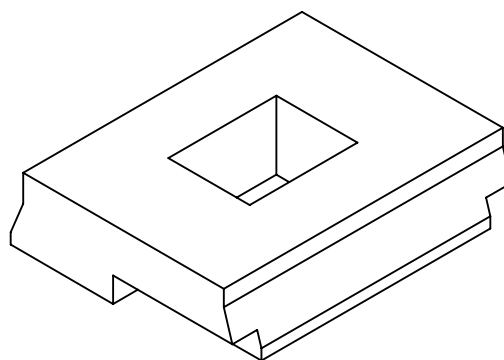
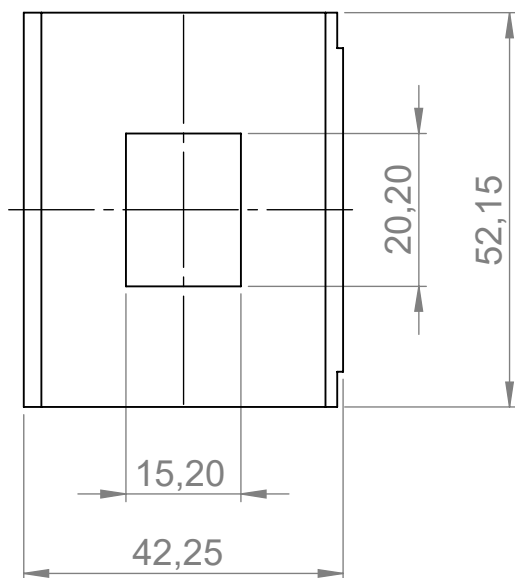
SECCIÓN A-A



REVISIÓN 3	TÍTULO: Planos Modelo		
ESCALA: 1:2	HOJA 16 DE 18	N.º DE DIBUJO B31	A4



SECCIÓN A-A



REVISIÓN

3

TÍTULO:

Planos Modelo

ESCALA: 1:1

HOJA 18 DE 18

N.º DE DIBUJO
B33

A4

